



Miguel André Andrade Cosme dos Santos Correia

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Doutora, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Co-orientador: Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca

Professor Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Júri:

Presidente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Arguente: Professor Doutor João Gouveia Bento Leal

Vogal: Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Vogal: Professor Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Março 2012

Título: Escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos.

Copyright © 2012 por Miguel André Correia, FCT/UNL e UNL

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.”

Agradecimentos

Um especial agradecimento à Doutora Elsa Alves pela orientação científica, interesse, dedicação, apoio e contribuição indispensável na realização dos ensaios experimentais.

Agradeço ao Professor Mário Franca e ao Engenheiro Riccardo Rossato pela total disponibilidade, apoio e pelos conhecimentos transmitidos, e à Adelaide e à Engenheira Helena Nogueira pelo contributo que deram na realização dos ensaios experimentais.

À minha família e amigos, pela confiança, carinho e incentivo.

Resumo

A presente dissertação tem por objectivo caracterizar experimentalmente o escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos. Em particular, foi estudado a influência da presença de múltiplos obstáculos nas características hidrodinâmicas da corrente tais como a velocidade da frente, velocidade média e altura média, perfis de velocidade e perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

Os ensaios experimentais decorreram numa instalação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) que consistia num canal de ensaios com 16 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,75 m de altura máxima, ligado por um circuito hidráulico a um tanque de capacidade 3,1 m³ onde se preparou a mistura de água e sedimento fino. Foram realizados nove ensaios experimentais utilizando obstáculos de 5 cm de altura colocados no canal de ensaios. Em todos os ensaios experimentais utilizou-se um sedimento fino designado por farinha de sílica, de diâmetro mediano $D_{50} = 20 \mu m$, e manteve-se constante o caudal inicial da mistura de água e sedimento fino de valor $Q_{c0} = 0,7 \text{ l/s}$. Os ensaios encontram-se organizados em três séries (S1, S2 e S3), onde foram utilizados, respectivamente, três, cinco e nove obstáculos colocados num trecho do canal. Cada série é composta por três ensaios onde se fez variar as condições iniciais, nomeadamente a concentração de sedimentos em suspensão da mistura de água e sedimento fino C_{s0} .

Foram efectuadas várias medições em cada ensaio, nomeadamente da velocidade da frente da corrente de turbidez, perfis de velocidade, perfis de concentração de sedimentos em suspensão na corrente e da concentração média de sedimentos do escoamento à entrada do canal. A medição dos perfis de velocidade foi efectuada em seis secções do canal recorrendo a um sistema UVP. Para a determinação da velocidade da frente foi medida a posição da frente ao longo do tempo através de um cronómetro. Para a determinação dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão foram recolhidas várias amostras da corrente de turbidez nas secções de montante e jusante dos obstáculos, e posteriormente determinado o peso seco dos sedimentos contidos em cada amostra.

Verificou-se que a presença de múltiplos obstáculos tem influência em algumas características médias da corrente de turbidez, não apenas a jusante, como também a montante dos obstáculos, e altera a forma dos perfis de velocidade na zona incidente aos obstáculos. A presença de múltiplos obstáculos reduz a velocidade da frente, aumenta a mistura entre a corrente e o fluido ambiente, e pode levar à alteração do regime de escoamento, em função do espaçamento entre obstáculos e da velocidade inicial da frente da corrente.

Palavras-chave: correntes de turbidez, obstáculos, sedimentação em albufeiras, ensaios laboratoriais.

Abstract

The main objective of this dissertation is to characterize experimentally the flow of turbidity currents over multiple obstacles. In particular, the influence of those obstacles on hydrodynamic characteristics such as the front velocity, average velocity, height, velocity profiles and suspended sediment concentration profiles was studied.

The experimental tests were conducted in a facility of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), which consisted in a channel with 16 m length, 0,30 m wide and 0,75 m height, connected by a hydraulic circuit to a tank with 3,1 m³ capacity where the mixture of water and fine sediment was prepared. Nine experimental tests were performed using 5 cm tall obstacles placed in the channel. In all experimental tests it was used a fine sediment designated by silica flour, of an average diameter $D_{50} = 20 \mu m$, and it was kept the constant value $Q_{c0} = 0,7$ l/s of the initial flow rate of the mix of water and fine sediment. The experimental tests were organized into three series (S1, S2 and S3), in which were utilized respectively three, five and nine obstacles in a stretch of the channel. Each serie is composed by three tests where the initial conditions were varied, in particular, the suspended sediment concentration C_{s0} of the mixture of water and fine sediment.

It was performed several measurements, in particular, of the water temperature, water level inside the channel, turbidity current front velocity, velocity profiles, suspended sediment concentration profiles and suspended sediment average concentration in the channel entrance. The velocity profiles measurements were taken in six sections of the channel using a UVP system. For the front velocity determination it was measured the front position over the time using a chronometer. For the suspended sediment concentration determination, it was collected several samples of the turbidity current, upstream and downstream of the obstacles, for later determination of the dry weight of the sediments in each one contained.

It was found that the presence of multiple obstacles have influence on some average characteristics of the turbidity current, not just downstream, but also on upstream of the obstacles, and it changes the shape of the velocity profile in the area incident to the obstacles. The presence of multiple obstacles slows down the front velocity and increases the mixture between the current and the ambient fluid, and can lead to alteration of the flow regime, depending on the spacing between the obstacles and the initial front velocity.

Key-Words: turbidity currents, obstacles, sedimentation in reservoirs, laboratory experiments.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objectivos.....	1
1.3	Organização da dissertação.....	2
2	Revisão bibliográfica.....	3
2.1	Correntes de turbidez.....	3
2.2	Ocorrência de correntes de turbidez em albufeiras.....	5
2.3	Controlo e prevenção da sedimentação em albufeiras.....	7
2.4	Caracterização de correntes de turbidez	9
2.4.1	Zona de imersão	10
2.4.2	Frente da corrente	11
2.4.3	Corpo da corrente.....	12
2.5	Escoamento de correntes de turbidez em torno de obstáculos	14
2.5.1	Obstáculo isolado	15
2.5.2	Múltiplos obstáculos	17
3	Instalação, equipamento e procedimento experimental.....	21
3.1	Introdução	21
3.2	Instalações laboratoriais	21
3.3	Equipamento.....	23
3.3.1	Equipamento utilizado nos ensaios de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos.....	23
3.3.2	Equipamento utilizado na determinação das concentrações de sedimentos em suspensão na corrente.....	27
3.4	Sedimentos	29
3.5	Obstáculos	30
3.6	Procedimento experimental.....	30
3.6.1	Simulação de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos.....	30
3.6.2	Determinação das concentrações de sedimentos.....	32
3.7	Processamento e análise de dados	32
4	Análise de resultados.....	35
4.1	Introdução	35
4.2	Caracterização das condições iniciais dos ensaios	37
4.3	Frente da corrente.....	38

4.3.1	Descrição geral	38
4.3.2	Velocidade da frente inicial	39
4.3.3	Evolução da frente da corrente	40
4.4	Características médias do escoamento	42
4.4.1	Velocidade e altura médias e velocidade máxima	42
4.4.2	Interface entre a corrente e o fluido ambiente	49
4.4.3	Perfis médios de velocidade	52
4.4.4	Perfis de concentração de sedimentos em suspensão	55
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	61
5.1	Conclusões	61
5.2	Desenvolvimentos futuros	62
6	Bibliografia	63
Anexos	65
	Anexo 1 – Valores da massa volúmica e de viscosidade cinemática da água em função da temperatura utilizados.....	65
	Anexo 2 – Perfis médios de velocidade da corrente nos transdutores (T1, T2, T3, T4, T5, T6).....	65
	Anexo 3 – Planta e corte da instalação experimental.	72

Índice de figuras

Figura 2.1 - Classificação das correntes de turbidez (<i>in</i> Alves, 2008).....	3
Figura 2.2 - a) Exemplo de uma “morning glory” na Austrália; b) Tempestade de areia no Iraque	4
Figura 2.3 - a) Avalanche de neve na Terra Nova, EUA ; b) Escoamento piroclástico do vulcão Mayon nas Filipinas em 1984	5
Figura 2.4 - Deposição de sedimentos em albufeiras (<i>in</i> Alves, 2008).	5
Figura 2.5 - Efeitos da sedimentação na barragem de Matilija, EUA	6
Figura 2.6 – Passagem de sedimentos através dois descarregadores de meio fundo e um descarregador de fundo na barragem Three Gorges em Yichang, China	8
Figura 2.7 – Possível descarga de varrimento na albufeira de Xiaolangdi na China	8
Figura 2.8 – Representação esquemática de uma corrente de turbidez (<i>in</i> Alves, 2008).	9
Figura 2.9 – Diferentes zonas de imersão obtidas em laboratório (<i>in</i> Rossato, 2010).	10
Figura 2.10 - Processo de desenvolvimento da zona de imersão (<i>in</i> Sousa, 2011).	10
Figura 2.11 – Instabilidades na frente da corrente: a) vórtices; b) lóbulos e fendas (<i>in</i> Alves, 2008).	11
Figura 2.12 – Velocidade da frente adimensionalizada, em função do ângulo de inclinação do fundo (<i>in</i> Alves, 2008).	12
Figura 2.13 – Perfis de velocidade e de concentração médios em correntes de turbidez (<i>adaptado de</i> Alves, 2008).	13
Figura 2.14 – Perfis adimensionais de velocidade e de concentração médios em correntes de turbidez e correntes salinas (<i>in</i> Graf e Altinakar, 2000).	14
Figura 2.15 – Esquema de ensaio de Rossato (2010) e Rossato e Alves (2011)	15
Figura 2.16 – Escoamento de correntes de turbidez sobre um obstáculo (<i>adaptado de</i> Oehy, 2003).	16
Figura 2.17 – Proporção do escoamento de uma corrente de turbidez que é previsível passar um obstáculo, em função da altura do obstáculo dividida pela altura do escoamento a montante, e do número de Froude a montante (<i>adaptado de</i> Oehy, 2003).	16
Figura 2.18 – Posição da velocidade da frente ao longo do tempo em todos os ensaios do estudo experimental de Adduce et al. (<i>adaptado de</i> Adduce et al., 2009).	17
Figura 2.19 – Deslocamento da corrente de densidade ao longo dos elementos de secção quadrada (<i>in</i> Peters e Venart, 2000).	18
Figura 2.20 – Regimes de escoamento acima dos obstáculos: a) escoamento sobre obstáculos isolados; b) <i>wake-interference flow</i> ; c) <i>escoamento deslizante sobre turbilhões</i> , (<i>in</i> Hanna e Britter, 2002)	19
Figura 2.21 – Localização instantânea da corrente de densidade nos casos: a) sem obstáculos, $t=4,2s$; b) com obstáculos, $t=4,2s$; c) sem obstáculos, $t=10,2s$; d) com obstáculos, $t=10,2s$, (<i>modificado de</i> Perez-Jimenez et al., 2008).	20
Figura 3.1 – Canal de ensaios da instalação laboratorial.	21
Figura 3.2 – Perfil longitudinal do canal de ensaios (<i>adaptado de</i> Alves, 2008).	22
Figura 3.3 – Tanque de mistura da instalação laboratorial.....	22
Figura 3.4 – Circuito hidráulico da instalação laboratorial.	23

Figura 3.5 – Representação esquemática da medição de perfis de velocidade de um escoamento em superfície livre com o sistema UVP (<i>in Alves, 2008</i>).	24
Figura 3.6 – Representação esquemática da janela de medição do sistema UVP (<i>in Alves, 2008</i>).	24
Figura 3.7 – Componentes do sistema UVP	24
Figura 3.8 – Caudalímetro.....	25
Figura 3.9 – Sistema de recolha de amostras.	26
Figura 3.10 - Bomba submersível.....	27
Figura 3.11 – Hidrómetro.	27
Figura 3.12 – Equipamento de filtração: a) Sistema de filtração, proveta graduada e esguicho com água; b) Balança digital, filtros, caixas de petri, pinça e espátula; c) Estufa; d) Exsicador.	28
Figura 3.13 – Curva granulométrica do material utilizado (extraído de Alves, 2008)....	29
Figura 3.14 – Montagem do equipamento UVP.	30
Figura 3.15 – Obstáculo posicionado no canal de ensaios.	31
Figura 3.16 – Mistura dos sedimentos antes da sua colocação no tanque de mistura.	31
Figura 3.17 – Representação da metodologia utilizada na filtração dos perfis de velocidade.	33
Figura 4.1 – Esquema de ensaios das series S1, S2 e S3	35
Figura 4.2 – Configuração da frente da corrente no ensaio S3-3: a) Vista de topo; b) imagens em sequência da interacção da frente da corrente com os obstáculos.....	38
Figura 4.3 – Velocidade da frente da corrente em função do fluxo sedimentar inicial..	40
Figura 4.4 - Velocidade da frente da corrente: a) Série1; b) Série2; Série3.....	41
Figura 4.5 – Posição da frente da corrente ao longo do tempo.	41
Figura 4.6 – Relação entre velocidade média a montante (T2) e a jusante (T5) dos obstáculos.	44
Figura 4.7 – Aspecto da altura da corrente durante e após os obstáculos nos ensaios: a) S2-3; b) S3-3.	45
Figura 4.8 – Relação entre a velocidade máxima e a velocidade média.	46
Figura 4.9 – Relação entre altura média e altura correspondente ao ponto de velocidade máxima.	47
Figura 4.10 – Variação da velocidade média no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.	48
Figura 4.11 - Variação da altura média no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.....	48
Figura 4.12 – Relação entre h e h_t	50
Figura 4.13 - Variação de h_t no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.	51
Figura 4.14 – Perfis de velocidade dos transdutores T2 e T5 nos ensaios: a) S1-1; b) S1-2; c) S1-3; d) S2-1; e) S2-2; e) S2-3; f) S2-3; g) S3-1; h) S3-3.....	52
Figura 4.15 – Perfis de velocidade do ensaio S3-3 nos transdutores: a) T3; b) T4.	53
Figura 4.16 – Perfis de velocidade adimensionais nos transdutores T2 e T5 nos ensaios: a) S1-3; b) S2-3; c) S3-3; d) S1-1; e) S2-1; f) S3-1; g) S1-2; h) S2-2.	54
Figura 4.17 – Perfis de velocidade adimensionais de todos os ensaios nos transdutores: a) T2; b) T5.	55
Figura 4.18 - Perfil de concentração de sedimentos em suspensão a montante dos obstáculos.....	56

Figura 4.19 – Perfil de concentração de sedimentos a jusante dos obstáculos.	56
Figura 4.20 – a) Relação entre C_{s0} e C_{sAF} ; b) Relação entre C_{s0} e C_{sBF}	58
Figura 4.21 - Relação entre C_{s0} e C_{sAF} e entre C_{s0} e C_{sBF}	58
Figura 4.22 - Relação entre $CsBF$ e $CsAF$ no presente estudo, Rossato, (2010), e em Alves, (2008).	59
Figura 4.23 - Perfis adimensionais de concentração de sedimentos a: a) montante dos obstáculos b) jusante dos obstáculos.	59

Índice de quadros

Quadro 3.1- Parâmetros UVP adoptados nos ensaios	25
Quadro 3.2 -Posição das diferentes tomadas dos sistemas de recolha de amostras de água e sedimentos no interior do canal	26
Quadro 4.1 - Concentração volumétrica dos sedimentos em suspensão inicial dos ensaios.....	36
Quadro 4.2 - Condições iniciais dos ensaios.....	36
Quadro 4.3 - Parâmetros característicos iniciais.....	37
Quadro 4.4 - Parâmetros característicos iniciais de diversos autores.....	37
Quadro 4.5 - Valores da velocidade da frente e fluxo sedimentar iniciais.	39
Quadro 4.6 - Velocidade da frente da corrente.	42
Quadro 4.7 - Velocidade média da corrente.	43
Quadro 4.8 - Altura média da corrente.	43
Quadro 4.9 - Velocidade máxima da corrente.	45
Quadro 4.10 - Altura do ponto de velocidade máxima.	46
Quadro 4.11 - Velocidade média da corrente no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo consecutivos.	47
Quadro 4.12 - Altura média da corrente no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo consecutivos.....	47
Quadro 4.13 - Altura do perfil de velocidades onde a velocidade se anula (h_t).	49
Quadro 4.14 - Relação ht/h	50
Quadro 4.15 - Altura h_t no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo.....	51
Quadro 4.16 - Relação h_t/h no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo.....	51
Quadro 4.17 - Valores da concentração média de sedimentos antes e após os obstáculos.....	57
Quadro 4.18 - Redução da concentração junto ao fundo.	58
Quadro 4.19 - Parâmetros característicos da corrente nas secções dos transdutores T2 e T5.....	60

Simbologia

Símbolo	Descrição	Grandeza
a_k	Coefficiente do polinómio de grau n ($k = 0, \dots, n$)	[-]
AF	Índice relativo às condições após os obstáculos	[-]
BF	Índice relativo às condições antes dos obstáculos	[-]
b	Largura superficial do escoamento; largura do canal experimental; distância ao fundo de referência, igual a $0,05h$	[L]
B	Fluxo sedimentar, $B = g'q_c = gRC_s hU$	[L ³ T ⁻³]
c_b	Concentração em volume de sedimentos junto ao fundo	[-]
c_s	Concentração em volume de sedimentos em suspensão local	[-]
c_{sm}	Concentração em volume de sedimentos em suspensão na altura a que a velocidade da corrente de turbidez é máxima	[-]
C_s	Concentração média em volume de sedimentos em suspensão na corrente de turbidez	[-]
D	Taxa de deposição de sedimentos no fundo devido à passagem de uma corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
D_{50}	Diâmetro do sedimento tal que n % em peso é mais fino	[L]
E	Taxa de erosão de sedimentos do fundo devido à passagem de uma corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
E_a	Coefficiente de entrada do fluido ambiente na corrente de turbidez	[-]
E_s	Coefficiente de entrada dos sedimentos do fundo em suspensão na corrente de turbidez	[-]
Fr_d	Número de Froude densimétrico, $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \alpha}}$	[-]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]
	Aceleração da gravidade reduzida, definida por	
g'	$g' = g \left(\frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_a} \right) = gRC_s$	[LT ⁻²]
h	Altura média da corrente de turbidez	[L]
h_m	Altura para a qual a velocidade da corrente de turbidez é máxima	[L]
h_n	Altura do ponto mais dianteiro da frente da corrente de turbidez	[L]
h_p	Profundidade de imersão da corrente de turbidez	[L]
h_r	Altura média da corrente de retorno	[L]
h_t	Altura da corrente de turbidez definida até ao ponto onde a velocidade se anula	[L]

H	Nível de água no interior da albufeira; nível de água no interior do canal experimental; altura do canal experimental	[L]
H_f	Altura da frente da corrente de turbidez	[L]
k	Número de ciclos no intervalo de tempo Δt	[-]
L	Comprimento genérico; comprimento do canal experimental	[L]
n	Grau do polinómio ajustado ao perfil de velocidades da corrente de turbidez	[-]
OB	Índice relativo às condições durante os obstáculos	[-]
q	Caudal líquido por unidade de largura do escoamento	[L ² T ⁻¹]
Q	Caudal líquido	[L ³ T ⁻¹]
Q_c	Caudal da mistura de água e sedimento fino	[L ³ T ⁻¹]
R	Densidade submersa dos sedimentos, $R = \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right)$	[-]
Re	Número de Reynolds da corrente de turbidez, $Re = \frac{Uh}{\nu}$	[-]
Re_f	Número de Reynolds da frente da corrente, $Re_f = \frac{U_f H_f}{\nu}$	[-]
Ri	Número de Richardson, $Ri = \frac{1}{Fr_d^2}$	[-]
S	Declive do fundo	[-]
S_{cr}	Valor critico de S_j	[-]
S_j	Número de ocorrências nas quais se verifica $a_k \geq \mu_k + \sigma_k$ ou $a_k \leq \mu_k - \sigma_k$, com $k = 0 \dots n$	[-]
t	Variável tempo; instante genérico	[T]
T_a	Temperatura da água	[-]
T_c	Temperatura da mistura de água e sedimento fino	[-]
u	Componente do vector de velocidade segundo a direcção x (direcção principal do escoamento)	[LT ⁻¹]
U	Velocidade média da corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
U_a	Velocidade média do fluido ambiente	[LT ⁻¹]
U_f	Velocidade da frente da corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
U_{max}	Velocidade máxima no corpo da corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
U_r	Velocidade média da corrente de retorno	[LT ⁻¹]
w_a	Velocidade de entrada do fluido ambiente na corrente de turbidez	[LT ⁻¹]
w_s	Velocidade de queda das partículas	[LT ⁻¹]
x	Coordenada longitudinal medida na direcção principal do	[L]

	escoamento	
x_f	Posição da frente da corrente de turbidez	[L]
y	Coordenada transversal em relação à direcção principal do escoamento	[L]
z	Coordenada vertical em relação à direcção principal do escoamento	[L]
α	Ângulo do fundo do canal experimental; ângulo do fundo	[-]
Δ	Variação	[-]
η	Coeficiente entre o caudal por unidade de largura do escoamento acima do obstáculo e o caudal por unidade de largura do escoamento de aproximação ao obstáculo, proposto por Oehy, (2003)	[-]
θ	Ângulo de incidência do feixe acústico dos transdutores do sistema UVP	[-]
μ_k	Média dos coeficientes a_k do polinómio de grau n ($k = 0, \dots, n$)	[-]
ν	Viscosidade cinemática da água	[L ² T ⁻¹]
ρ_a	Massa volúmica do fluido ambiente	[ML ⁻³]
ρ_c	Massa volúmica média da corrente. No caso de correntes de turbidez: $\rho_c = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)C_s$	[ML ⁻³]
ρ_s	Massa volúmica dos sedimentos	[ML ⁻³]
σ_k	Desvio padrão dos coeficientes a_k do polinómio de grau n ($k = 0, \dots, n$)	[-]
o	Índice relativo às condições iniciais	[-]

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A sedimentação é um processo que afecta as albufeiras naturais e artificiais, colocando em risco a sua sustentabilidade a longo prazo. A sedimentação em albufeiras é devida em geral às correntes de turbidez, que constituem um dos principais mecanismos de transporte e deposição de sedimentos finos.

As correntes de turbidez formam-se sobretudo em períodos de ocorrências de chuvas intensas, onde quantidades elevadas de sedimentos são arrastadas para os cursos de água afluentes à albufeira. Ao chegar à albufeira, o escoamento dos cursos de água carregados de sedimentos perde velocidade, fazendo com que os sedimentos mais grosseiros se depositem no fundo. No entanto, devido à diferença de densidades, o escoamento carregado de sedimentos finos (que não se chegaram a depositar), mergulha sob a água limpa da albufeira, dando origem a um escoamento estratificado designado por corrente de turbidez, capaz de percorrer grandes distâncias e atingir a zona da barragem.

A sedimentação diminui a capacidade de armazenamento da albufeira, o que eventualmente pode originar uma redução na capacidade de regulação do escoamento, aumento da erosão nas margens, controle de cheias e produção de energia. Os sedimentos podem ainda afectar a própria barragem e os seus órgãos hidráulicos, bem como a qualidade da água para o consumo. Em consequência, a previsão da sedimentação é fundamental para o planeamento e gestão de albufeiras, bem como na implementação de medidas de controlo e mitigação.

Existem na bibliografia poucos estudos sobre medidas de controlo de correntes de turbidez, em particular, a utilização de obstáculos na prevenção da sedimentação e sobre a influência da topografia do fundo da albufeira no escoamento da corrente de turbidez. Oehy (2003) e Oehy e Schleiss (2007), estudaram técnicas de controlo da sedimentação por correntes de turbidez, tais como obstáculos, jactos de água, telas e cortinas de bolhas colocados no fundo. Em particular, concluíram que o uso de obstáculos pode bloquear de forma total ou parcial as correntes de turbidez. Rossato (2010) e Rossato e Alves (2011), estudaram e caracterizaram o escoamento de correntes de turbidez interagindo com um obstáculo isolado, fazendo variar a altura do obstáculo e a concentração de sedimentos em suspensão do escoamento de aproximação.

Na prática, as condições locais da albufeira determinam qual a medida mais eficaz no controlo da sedimentação por correntes de turbidez (Oehy e Schleiss, 2007). No entanto, são necessários estudos que permitam caracterizar cada tipo de solução de modo a que sejam implementadas na prática com sucesso.

1.2 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação é a caracterização do escoamento de correntes de turbidez interagindo com vários obstáculos de igual dimensão, nomeadamente a influência da presença destes elementos nas características hidrodinâmicas da corrente tais como a velocidade da frente, velocidade média e altura média, perfis de velocidade e perfis de concentração de sedimentos em suspensão, tendo por base os resultados obtidos em ensaios experimentais realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), numa instalação especificamente construída para ensaios de correntes de turbidez.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. Neste capítulo foi apresentado o enquadramento geral do tema e o objectivo deste estudo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, abordando o enquadramento das correntes de turbidez no contexto do fenómeno geral das correntes de densidade, e exemplos destas na natureza. Será ainda abordado a problemática da sedimentação em albufeiras e feita uma caracterização e descrição física das correntes de turbidez. Por último, é descrito o escoamento de correntes de turbidez em torno de um obstáculo isolado e de múltiplos obstáculos.

No capítulo 3 descrevem-se as instalações laboratoriais, o equipamento, o tipo de sedimento utilizado nos ensaios e o procedimento experimental, bem como as condições experimentais dos ensaios e a metodologia utilizada no tratamento dos dados obtidos.

No capítulo 4 procede-se à descrição das condições iniciais dos ensaios e à análise dos resultados obtidos. Serão abordados e discutidos aspectos relativos à velocidade da frente (velocidade a montante e a jusante dos obstáculos), características médias da corrente tais como a velocidade média e altura média, perfis de velocidade e perfis de concentração de sedimentos. Serão ainda analisados alguns parâmetros característicos da corrente relacionados com estas grandezas.

Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões deste estudo e propostas de desenvolvimento para estudos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Correntes de turbidez

As correntes de turbidez são um processo de transporte de sedimentos que ocorre sobretudo em albufeiras, lagos e oceanos, e pertencem a um vasto grupo de escoamentos estratificados conhecidos por correntes de densidade.

Uma corrente de densidade pode ser definida como o escoamento de um fluido de massa volúmica ρ_c , imerso num fluido ambiente de massa volúmica ρ_a . Esta diferença de densidades, por acção da força gravítica, constitui a principal força motriz do escoamento e pode ter origem na presença de sais, na presença de sedimentos ou pela diferença de temperaturas entre os dois fluidos. Chama-se corrente de turbidez quando a diferença de densidades resulta da presença de sedimentos na água. As correntes de turbidez, em grande parte, têm origem na afluência de quantidades elevadas de sedimentos que são arrastados para os cursos de água durante a ocorrência de uma cheia. No entanto estas podem também ter origem em escorregamentos ou deslizamentos abruptos de materiais situados nas encostas ou margens dos cursos de água, lançamento de resíduos de minério, operações de dragagem e descargas (de varrimento ou de fundo) de barragens.

As correntes de densidade e de turbidez classificam-se em correntes de fundo se $\rho_c > \rho_a$, correntes de superfície se $\rho_c < \rho_a$, ou correntes intermédias se $\rho_{a2} > \rho_c > \rho_{a1}$. Na figura 2.1 é representada esta classificação:

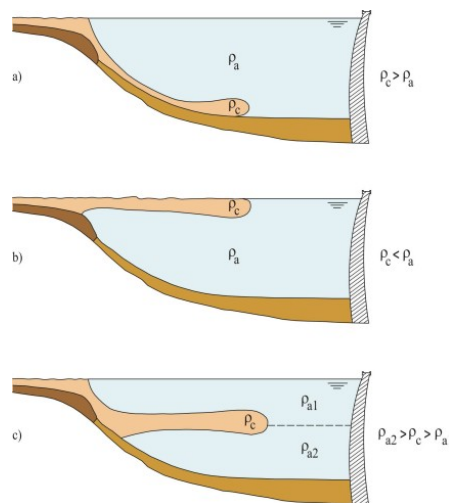


Figura 2.1 - Classificação das correntes de turbidez (in Alves, 2008).

- a) Corrente de turbidez de fundo, quando a água do escoamento afluente é mais densa do que a água da albufeira.
- b) Corrente de turbidez de superfície, quando a água do escoamento afluente é menos densa do que a água da albufeira.
- c) Corrente de turbidez intermédia, quando a água do escoamento afluente é mais densa do que a água da superfície da albufeira, mas menos densa do que a água da albufeira a profundidades maiores (estratificação que acontece por exemplo devido à diferença de temperatura entre as camadas de água superior e inferior da albufeira).

As correntes de densidade originadas pela presença de sais ou devidas à diferença de temperatura são classificadas como conservativas pois os sais e o calor podem sofrer advecção e difusão mas conservam a sua quantidade total no escoamento. As correntes de turbidez são classificadas como não conservativas pois podem erodir e depositar sedimentos no fundo,

excepto quando o volume de sedimentos erodidos é igual ao volume de sedimentos depositados. Numa corrente de turbidez, os sedimentos são mantidos em suspensão pela turbulência do escoamento (Alves, 2008), e ao longo do seu percurso ocorre a deposição de partículas de maior dimensão e a integração na corrente de sedimentos que estavam presentes no fundo (no caso de uma corrente de turbidez de fundo).

Nos oceanos, para além das correntes de turbidez, são comuns as correntes de densidade provocadas pela diferença de temperatura gerada pelo aquecimento da camada superior da água, e de correntes salinas em zonas de estuários ou em zonas de ligação de mares a oceanos, onde existe uma diferença grande de salinidade. Exemplo deste último caso é o estreito de Gibraltar, onde a água do Mar Mediterrâneo (mais salina) flui por baixo da água Oceano Atlântico. Em Rossato (2010) é referido que este fenómeno pode originar a formação de ondas internas em marés de grande amplitude.

Na natureza ocorrem fenómenos de correntes de densidade não apenas na água mas também no ar, tais como, as brisas marítimas e as tempestades de areia. As brisas marítimas são correntes de densidade que resultam da diferença de temperatura entre duas massas de ar. Quando se dá o aquecimento da camada de ar sobre a terra, este ascende, sendo o seu lugar ocupado pela camada de ar mais frio vinda do mar.

Na figura 2.2 (a) observa-se uma “*morning glory*” no golfo da Carpentária, Austrália. Esta forma-se quando duas brisas marítimas se encontram sobre a península, obrigando o ar a subir, e originam uma linha de nuvens. As tempestades de areia (Figura 2.2 (b)), são geradas pela ascensão em condições instáveis de ar quente e húmido, originando a descida de uma corrente de ar fria, que ao passar por zonas áridas levanta a poeira do solo. Outros exemplos de correntes de densidade são as avalanches de neve e os escoamentos de partículas provenientes de erupções vulcânicas (Figura 2.3).

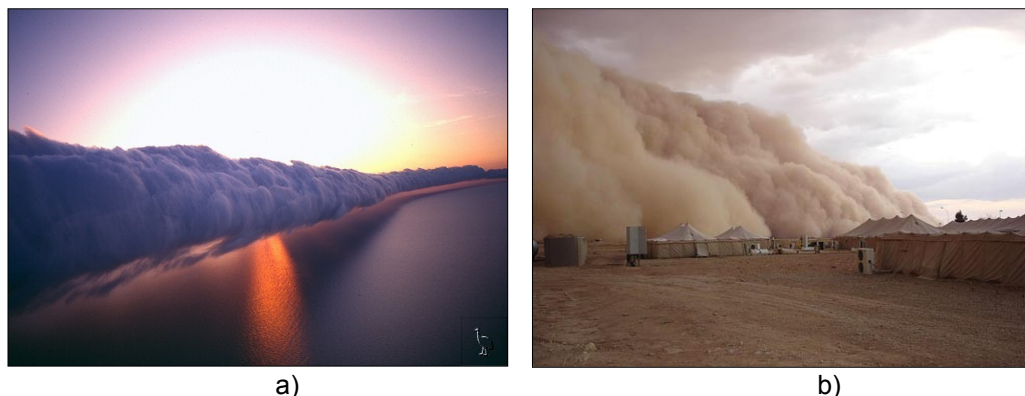


Figura 2.2 - a) Exemplo de uma “*morning glory*” na Austrália (extraído de <http://www.ooodd.com/1074-morning-glory-cloud-australia> em 17-12-2011); b) Tempestade de areia no Iraque (extraído de <http://www.allamericanpatriots.com/photos/sandstorm-iraq> em 17-12-2011).

O interesse e necessidade do estudo das correntes de turbidez advêm principalmente dos seus impactos negativos, em particular nas albufeiras naturais ou artificiais. Na bibliografia podem-se encontrar diversos estudos teóricos e experimentais sobre correntes de densidade e de turbidez, abordando aspectos como a sua origem, a formação do delta de deposição, ressalto hidráulico e mistura com o fluido ambiente. Em Alves (2008) é possível encontrar uma informação vasta sobre os principais aspectos deste fenómeno, e ainda alguns resultados experimentais tendo em vista caracterizar as correntes de turbidez originadas por um escoamento com sedimentos finos em suspensão e desenvolver um modelo computacional para a simulação de correntes de turbidez em albufeiras de geometria simples.



Figura 2.3 - a) Avalanche de neve na Terra Nova, EUA (*extraído de* <http://www.dinosoria.com/avalanche.htm> em 27-02-2012); b) Escoamento piroclástico do vulcão Mayon nas Filipinas em 1984 (*extraído de* http://www.uhh.hawaii.edu/~csav/gallery/decker/philippines_mayon.php em 17-12-2011).

2.2 Ocorrência de correntes de turbidez em albufeiras

Numa albufeira, com o aproximar da barragem, o escoamento perde velocidade, originando numa zona a montante da albufeira denominada por delta, a deposição dos sedimentos de maiores dimensões como por exemplo de areias e seixos. Os sedimentos mais finos em suspensão na coluna de água, como os siltes e as argilas conseguem transpor o delta e serão depositados mais a jusante quando a capacidade de transporte e turbulência do escoamento for suficientemente pequena para o permitir. O delta (Figura 2.4) é caracterizado por um talude longo e de inclinação suave a montante e por um talude curto e de declive elevado a jusante. Por vezes a deposição de sedimentos neste local pode interferir com a navegabilidade e ter de ser removido através de dragagens (Kostic e Parker, 2003).

Quando um curso de água afluente contém uma quantidade elevada de sedimentos em suspensão, a diferença de densidades poderá levar ao mergulho deste escoamento na água limpa da albufeira e gerar uma corrente de turbidez.

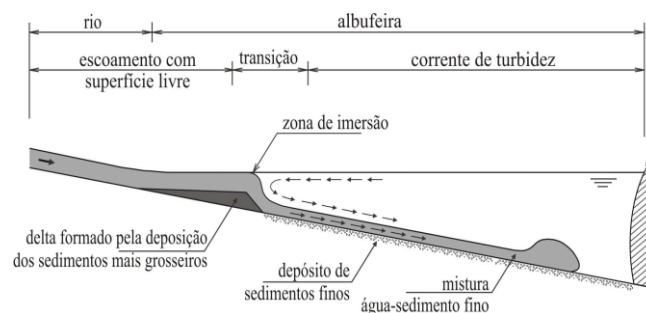


Figura 2.4 - Deposição de sedimentos em albufeiras (*in* Alves, 2008).

À medida que as partículas de maiores dimensões da corrente de turbidez se depositam no fundo, a diferença de densidades entre a corrente de turbidez e a água da albufeira diminui. Consequentemente, a força gravitacional que actua sobre a corrente diminui, originando uma diminuição da velocidade da corrente. Oehy (2003) considera que uma corrente de turbidez provocada por uma pequena cheia raramente atinge a zona da barragem, pois para percorrer grandes distâncias a corrente de turbidez terá de ter uma quantidade de movimento suficientemente elevada, de forma a provocar erosão no fundo (integração de sedimentos presentes no fundo, gerando correntes com aceleração) e ter capacidade de manter esses sedimentos em suspensão. Quando uma corrente de turbidez atinge o corpo da barragem, a sua

energia cinética é convertida em energia potencial, iniciando-se a formação de uma camada de sedimentos finos no fundo (Oehy, 2003).

As correntes de turbidez podem ser responsáveis pela deposição de grandes volumes de sedimentos e são de grande importância na distribuição sedimentar ao longo de uma albufeira (Fan e Morris, 1998). A taxa de assoreamento permite quantificar a sedimentação e é normalmente expressa em volume de sedimentos depositados numa albufeira por ano, ou como percentagem do volume de armazenamento inicial perdido devido à sedimentação. Este parâmetro varia de região para região e depende da quantidade de sedimentos afluentes e da capacidade de retenção das albufeiras traduzida pela relação entre o escoamento anual afluente médio e o volume de armazenamento (Alves, 2008).

White (2001) apresentou taxas de assoreamento em albufeiras com base na informação disponível de 2300 barragens de 31 países de todos os continentes, referindo valores de perdas anuais da capacidade de armazenamento entre 0,08% e os 2,3%, e de 0,48% como valor médio. Para Portugal, refere um valor de perda anual da capacidade de armazenamento de 0,1% com base na informação disponível de sete barragens. No entanto, o autor refere estudos que chegaram a valores bastante superiores, como por exemplo o de Mahmood (1987) que chegou a um valor médio de 1% para as perdas anuais da capacidade de armazenamento nas albufeiras. Em Alves (2008) e Bатуca e Jordaan (2000) são citados exemplos de albufeiras com valores bastante superiores e de casos extremos de assoreamento. Na figura 2.5 observa-se um caso extremo de assoreamento numa pequena albufeira nos EUA. Num período de seca, verifica-se que toda a área da albufeira até à zona da barragem se encontra preenchida com sedimentos finos.



Figura 2.5 - Efeitos da sedimentação na barragem de Matilija, EUA (*extraído de* http://www.venturariver.org/2011_04_01_archive.html em 17-12-2011).

A deposição de sedimentos não acarreta apenas problemas para a albufeira e barragem, mas também a vários quilómetros para montante e jusante. A montante da barragem, a sedimentação é responsável pela redução do volume de armazenamento da albufeira, comprometendo a regulação do escoamento, as funções de abastecimento, controlo de cheias, produção de energia, navegação, recreio e benefícios ambientais dependentes das descargas da barragem (Alves, 2008). A sedimentação pode ainda levar ao bloqueio da entrada das tomadas de água existentes na albufeira e alterar a qualidade da água, uma vez que água encontra-se sujeita a trocas químicas e biológicas com os sedimentos depositados. Por outro lado, a elevação do leito do curso de água devido à sedimentação pode levar à elevação do nível freático e causar inundações nas zonas ribeirinhas em períodos de cheias.

No que diz respeito à barragem, a entrada de sedimentos para os circuitos hidráulicos pode causar abrasão, originando perdas de rendimento nas turbinas e bombas, e afectar as válvulas e comportas (Fan e Morris, 1998). Em casos extremos, os sedimentos podem num período de semanas inutilizar os órgãos hidráulicos (Bouvard, 1992 *apud* Fan e Morris, 1998).

A jusante da barragem, devido à redução da afluência de sedimentos, pode verificar-se a erosão do leito do rio e margens, e a descida do nível freático, originando impactes para ecossistema do curso de água. Em Fan e Morris (1998) é ainda referido a redução da profundidade de navegação e a infra-escavação das fundações de pontes.

2.3 Controlo e prevenção da sedimentação em albufeiras

Tendo em vista a diminuição dos impactes associados à sedimentação em albufeiras, têm sido postas em prática várias medidas de controlo e prevenção, baseadas na redução da afluência de sedimentos à albufeira, na redução da deposição de sedimentos na albufeira e na remoção dos sedimentos depositados.

As medidas de redução da afluência de sedimentos à albufeira podem passar por dois tipos: as medidas de controlo da erosão na bacia hidrográfica e a construção de obras de retenção de sedimentos a montante da albufeira. As medidas de controlo da erosão na bacia hidrográfica são medidas que visam essencialmente reduzir a produção de sedimentos no interior das bacias hidrográficas e evitar que estes cheguem aos cursos de água. Os seus resultados apenas se fazem sentir a longo prazo e podem representar custos elevados em casos de bacias hidrográficas de grande dimensão. Em Fan e Morris (1998) são descritas várias medidas como por exemplo a adaptação correcta das actividades do solo ao tipo de clima e terreno, maximização da infiltração, maximização do recobrimento vegetativo dos terrenos, e a captação dos sedimentos antes de saírem do local. Os planos de controlo de erosão são na maior parte das albufeiras a única estratégia recomendada (Fan e Morris, 1998). No entanto os autores referem que muitos planos têm sido ineficazes por culpa de mau planeamento e execução, bem como pela falta de compromisso a longo prazo por parte dos utilizadores dos terrenos das bacias hidrográficas. Mesmo quando eficazes, os autores referem ainda que estes planos não representam uma solução completa para os problemas da sedimentação, mas sim retardam a utilização de outro tipo de medidas complementares.

As obras de retenção de sedimentos a montante podem ser por exemplo, obstáculos e cortinas de vegetação, que visam interceptar os sedimentos antes de atingirem as albufeiras. De acordo com Alves (2008), constituem uma medida eficaz a curto prazo mas requerem uma manutenção periódica de modo a manter a capacidade de retenção de sedimentos. A construção de barragens mais pequenas a montante é em muitas albufeiras o factor mais importante no controlo da sedimentação (Fan e Morris, 1998), no entanto os custos são elevados e acarretam problemas associados à criação de uma nova barragem para as zonas ribeirinhas, nomeadamente de sedimentação, erosão, alterações dos níveis freáticos e perturbação dos ecossistemas.

A redução da deposição de sedimentos na albufeira é conseguida através da passagem dos sedimentos pela barragem (Figura 2.6) por descarregadores de superfície, de meio fundo ou de fundo, ou ainda através de túneis (by-pass). Estas operações são efectuadas em períodos de cheias, interferindo pouco com o padrão de transporte de sedimentos no curso de água, sendo por isso de acordo com Alves (2008) uma medida ambientalmente aceitável.

Outra técnica de redução da deposição de sedimentos na albufeira é a passagem de correntes de turbidez através de descargas de fundo. É um método aplicável apenas quando as correntes de turbidez transportam sedimentos muito finos para a barragem, e cujos casos de sucesso são muito reduzidos (White, 2001).



Figura 2.6 – Passagem de sedimentos através dois descarregadores de meio fundo e um descarregador de fundo na barragem Three Gorges em Yichang, China (*extraído de* http://www.chinadaily.com.cn/regional/2009-07/02/content_8348539_4.htm em 17-12-2011).

A remoção dos sedimentos depositados na albufeira pode ser feita através de dragagens ou de descargas de varrimento. A dragagem é uma técnica eficaz a curto prazo (Alves, 2008) mas dispendiosa, não sendo por isso economicamente viável em albufeiras de grandes dimensões pois geralmente os custos associados à construção (se for possível) de uma nova barragem com um determinado volume de armazenamento, são menores do que a remoção de um igual volume de sedimentos por dragagem (ICOLD, 1989). A aplicação de dragagens é por isso limitada a pequenas albufeiras ou para aliviar problemas locais devido aos sedimentos depositados (ICOLD, 1989), mas ainda assim introduzem problemas ambientais e económicos pela finalidade a dar aos materiais dragados.

As descargas de varrimento são muito semelhantes à passagem de sedimentos por descarregadores. No entanto, nesta técnica, a velocidade do escoamento e consequente capacidade de transporte de sedimentos gerada na albufeira pela abertura dos descarregadores da barragem é bem maior, permitindo não só a passagem dos sedimentos em suspensão como também a remoção dos sedimentos depositados no fundo da albufeira. Ainda assim, no caso de albufeiras de grande dimensão, os efeitos podem-se fazer sentir apenas nas zonas próximas da barragem. Esta técnica tem como inconvenientes a necessidade de esvaziamento total ou parcial da albufeira e os impactes negativos a jusante da barragem pela descarga de elevadas concentrações de sedimentos no curso de água, como se observa na figura 2.7.



Figura 2.7 – Possível descarga de varrimento na albufeira de Xiaolangdi na China (*extraído de* http://photoblog.msnbc.msn.com/_news/2011/07/05/7019010-water-gushes-from-dam-to-clear-silt-in-china em 17-12-2011)

2.4 Caracterização de correntes de turbidez

As correntes de turbidez apresentam duas regiões principais distintas (Figura 2.8): a frente da corrente, caracterizada por grande complexidade e turbulência, seguida por uma região de espessura e densidade inferiores designada por corpo da corrente, cujo comprimento está relacionado com a duração dos eventos que geram a afluência dos sedimentos. Assim, em eventos de longa duração (horas ou dias), o comprimento do corpo da corrente será muito superior ao comprimento da frente e a corrente diz-se contínua. Para eventos de curta duração, o corpo apresenta dimensões reduzidas e a corrente gerada denomina-se descontínua. O ponto mais dianteiro (segundo o eixo x) da corrente, de altura h_n , é chamado de nariz da corrente.

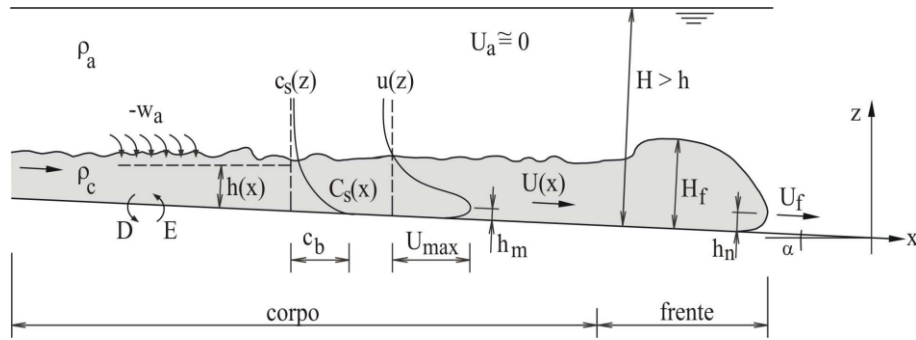


Figura 2.8 – Representação esquemática de uma corrente de turbidez (in Alves, 2008).

A massa volúmica média de uma corrente de turbidez é dada por:

$$\rho_c = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)C_s \quad (2.1)$$

onde ρ_a é a massa volúmica do fluido ambiente, ρ_s a massa volúmica dos sedimentos e C_s a concentração média em volume de sedimentos em suspensão na corrente.

Para classificar o regime de escoamento das correntes de turbidez, é usual utilizar-se o número de Richardson, que traduz a relação entre as forças de gravidade (esta reduzida pela diferença de densidade entre a corrente e o fluido ambiente) e as forças de inércia, e é dado por:

$$Ri = \frac{g'h \cos \alpha}{U^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad (2.2)$$

onde Fr_d é o número de Froude densimétrico, dado por:

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \alpha}} \quad (2.3)$$

em que U é a velocidade média da corrente, h a altura média da corrente, e g' a aceleração da gravidade reduzida dada por:

$$g' = g \left(\frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_a} \right) = g \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) C_s = gRC_s \quad (2.4)$$

onde R é a densidade submersa dos sedimentos, dada por:

$$R = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \quad (2.5)$$

As correntes de turbidez classificam-se como lentas se $Ri > 1$, e como rápidas se $Ri < 1$. Quando $Ri = 1$ dizem-se em regime crítico.

2.4.1 Zona de imersão

A zona de imersão corresponde ao local onde se forma o escoamento estratificado. No caso de uma corrente de turbidez de fundo corresponde à zona onde o escoamento afluente carregado de sedimentos mergulha sob a água da albufeira. À superfície é perceptível pela diferença de turvação entre as duas massas de água e pela presença de detritos a flutuar à superfície. Esta zona situa-se em geral, imediatamente a jusante do delta de deposição (Figura 2.4) e depende não só da profundidade e geometria da albufeira, mas também do caudal e concentração de sedimentos do escoamento afluente, tal como demonstra a figura 2.9.



Figura 2.9 – Diferentes zonas de imersão obtidas em laboratório (*in* Rossato, 2010).

Na figura 2.10 é representado o processo de formação da zona de imersão. No início do processo o escoamento afluente desloca o fluido ambiente para jusante, até se chegar a um equilíbrio de forças. À medida que o escoamento progride e a profundidade no fluido ambiente aumenta, existe a influência do aumento da pressão para se atingir uma profundidade de imersão estável (h_p).

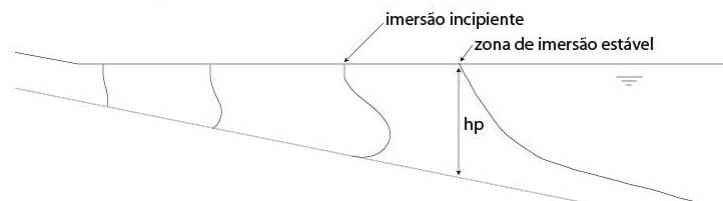


Figura 2.10 - Processo de desenvolvimento da zona de imersão (*in* Sousa, 2011).

A zona de imersão é caracterizada por grande tridimensionalidade e pela mistura entre o escoamento afluente e o fluido ambiente. De acordo com Akiyama e Stefan (1984), essa mistura ocorre através da interface entre os fluidos mas também na zona de imersão devida à variação brusca da profundidade no escoamento. Para declives do fundo suaves a mistura entre o escoamento afluente e o fluido ambiente será mais pequena ou desprezável comparativamente a fundos com declives mais acentuados, onde a profundidade de imersão h_p é maior. Devido à diferença de declives entre a zona de montante e jusante do delta ser geralmente elevada, a corrente ao mergulhar vai ter um aumento relativamente brusco da velocidade (Sousa, 2011).

Segundo Alves (2008), após a zona de imersão, as características da corrente de turbidez de fundo dependem do caudal afluente, da densidade da mistura, do atrito no fundo e do atrito na interface.

2.4.2 Frente da corrente

A frente das correntes de densidade (e de turbidez) é caracterizada por forte tridimensionalidade e turbulência, apresentando geralmente uma altura maior do que o resto da corrente para compensar a resistência imposta pelo fluido ambiente ao avanço da corrente (Sousa, 2011). Nesta região ocorre a mistura de fluido ambiente na corrente devido à formação de vórtices (Figura 2.11 (a)) e de uma estrutura complexa de lóbulos e fendas (Figura 2.11 (b)). A origem destas estruturas deve-se à existência de instabilidades convectivas e de instabilidades de Kelvin-Helmholtz. As instabilidades de Kelvin-Helmholtz ocorrem na interface entre dois fluidos de velocidade e densidade diferentes, originando o aparecimento de vórtices na parte superior da frente da corrente. Os contornos irregulares em planta da frente da corrente devem-se à presença de lóbulos e fendas que avançam de forma aparentemente desigual. Os lóbulos são continuamente absorvidos pelos lóbulos vizinhos até atingirem a sua dimensão máxima, altura a partir da qual se subdividem, dando origem a fendas e a lóbulos menores que por sua vez voltam a crescer e a se subdividir de igual forma, repetindo-se este ciclo.

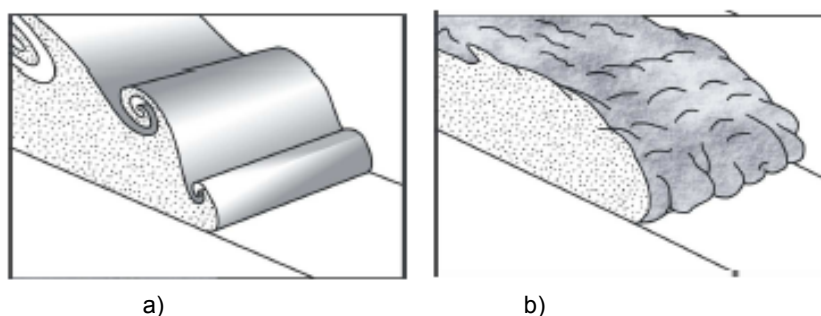


Figura 2.11 – Instabilidades na frente da corrente: a) vórtices; b) lóbulos e fendas (in Alves, 2008).

A ocorrência da mistura na zona da frente é de grande importância na dinâmica das correntes de turbidez, determinando a sua capacidade de transporte de sedimentos a longas distâncias bem como as características das estruturas dos depósitos de sedimentos criados pela sua passagem.

Em Alves (2008) é referido e verificado experimentalmente, em fundos fixos e sem obstáculos, que a frente da corrente de turbidez se desloca com uma velocidade (U_f) aproximadamente constante. A velocidade da frente da corrente pode ser expressa de acordo com Altinakar *et al.* (1990), pela seguinte função:

$$U_f = B_0^{1/3} f(\alpha, Re_f) \quad (2.6)$$

onde B_0 é o fluxo sedimentar do escoamento de aproximação, α o ângulo do fundo do canal com a horizontal e Re_f o número de Reynolds na região da frente ($Re_f = \frac{U_f H_f}{\nu}$), H_f é a altura da frente da corrente, e ν a viscosidade cinemática do fluido ambiente.

O fluxo sedimentar B é dado por:

$$B = g' h U \quad (2.7)$$

Altinakar *et al.* (1990) referem que para $Re_f > \approx 1000$ a velocidade da frente depende apenas do fluxo sedimentar e do ângulo de inclinação do fundo, simplificando a função anterior para:

$$U_f = B_0^{1/3} f(\alpha) \quad (2.8)$$

A influência do declive do fundo do canal está relacionada com a compensação das forças de resistência do fluido ambiente pelas forças de gravidade.

Reunindo vários dados laboratoriais, Graf e Altinakar (2000) apresentam os seguintes valores médios do parâmetro $U_f/B_0^{1/3}$:

$$\frac{U_f}{B_0^{1/3}} = 1,5 \pm 0,2 \quad \text{se } 5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (2.9)$$

$$0,7 < \frac{U_f}{B_0^{1/3}} < 1,5 \quad \text{se } \alpha < 5^\circ \quad (2.10)$$

Na figura 2.12 é representada graficamente a variação do parâmetro $\frac{U_f}{B_0^{1/3}}$ em função do ângulo de inclinação do fundo (α), baseado em resultados obtidos por diversos autores.

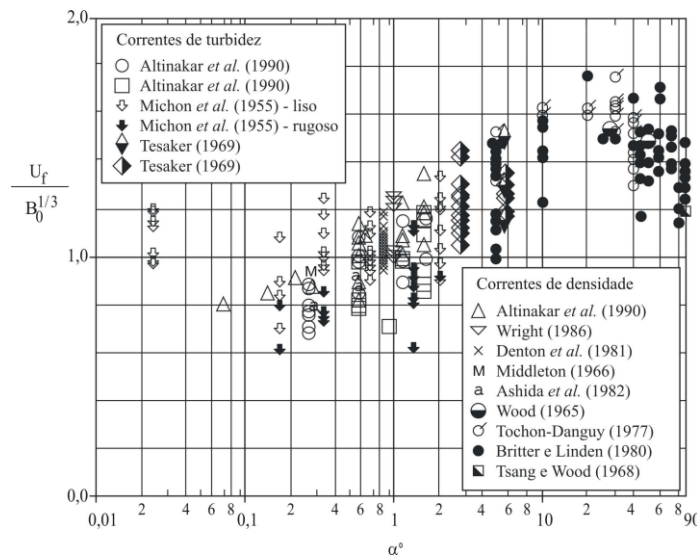


Figura 2.12 – Velocidade da frente adimensionalizada, em função do ângulo de inclinação do fundo (in Alves, 2008).

As zonas de descontinuidade no fundo como por exemplo mudanças de declive, podem originar a formação de um ressalto hidráulico interno na corrente e levar à erosão dos sedimentos depositados nessa zona (Alves, 2008).

2.4.3 Corpo da corrente

O corpo de uma corrente de densidade apresenta uma velocidade superior à velocidade da frente da corrente. A velocidade média (U) numa corrente de turbidez, a altura média (h), bem como a concentração média de sedimentos em suspensão (C_s), podem ser calculadas a partir das seguintes equações diferenciais propostas por Ellison e Turner (1959):

$$Uh = \int_0^\infty u dz \quad (2.11)$$

$$U^2 h = \int_0^\infty u^2 dz \quad (2.12)$$

$$UC_s h = \int_0^\infty u c_s dz \quad (2.13)$$

onde u e c_s são respectivamente o valor da velocidade e da concentração de sedimentos em suspensão correspondentes a uma coordenada vertical z (ver figura 2.8).

De acordo com Altinakar *et al.* (1996), a relação entre a velocidade da frente da corrente e a velocidade média do corpo para declives do fundo entre 1% a 4% encontra-se dentro do seguinte intervalo:

$$0,6 < \frac{u_f}{U} < 1,0 \quad (2.14)$$

Na figura 2.13 representam-se os perfis de velocidade e de concentração de sedimentos em suspensão de uma corrente de turbidez.

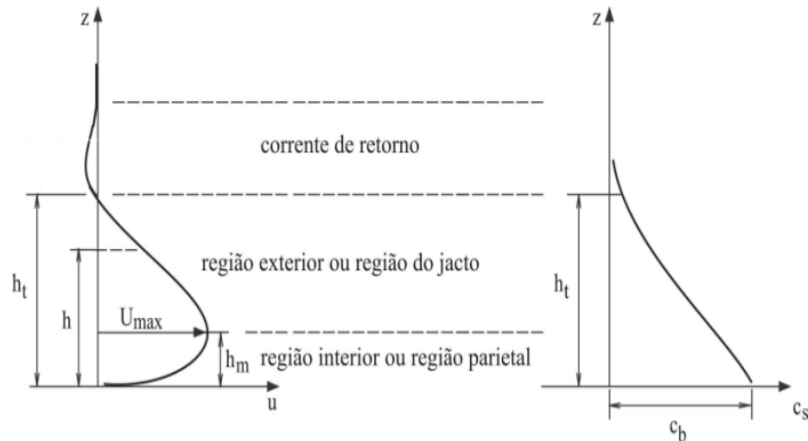


Figura 2.13 – Perfis de velocidade e de concentração médios em correntes de turbidez (adaptado de Alves, 2008).

O perfil de velocidades médio $U(x)$ de uma corrente de turbidez é caracterizado por duas zonas distintas separadas pelo ponto onde a velocidade é máxima (U_{max}), designadas por região interior ou parietal e região exterior ou do jacto. Na região exterior, a turbulência é devida à interface da corrente com o fluido ambiente, e na região interior é devido ao atrito do fundo. A velocidade média da corrente aumenta com a distância ao fundo até atingir o seu valor máximo a uma altura $z = h_m$, a partir do qual diminui até se anular na zona de interface da corrente com o fluido ambiente a uma altura $z = h_t$. Após a zona de interface, o perfil de velocidades toma valores negativos devido à deslocação (provocada pela corrente) do fluido ambiente em sentido contrário ao da corrente, voltando ao valor zero quando a velocidade do fluido ambiente for nula ou desprezável. Esta zona onde a velocidade é negativa designa-se por corrente de retorno.

No perfil de concentrações $C_s(x)$, o valor da concentração diminui com a distância ao fundo devido às partículas mais grosseiras tenderem a acumular-se junto ao fundo, enquanto as partículas mais finas se distribuem mais uniformemente na altura (z) da corrente. Por esta razão, a massa volúmica do corpo da corrente de turbidez na zona da interface com o fluido ambiente é muito inferior à massa volúmica da zona junto ao fundo.

A figura 2.14 mostra os perfis adimensionais de velocidade e concentração de sedimentos em suspensão obtidos experimentalmente por Altinakar *et al.* (1996) em correntes de turbidez e correntes salinas, onde c_{sm} corresponde à concentração de sedimentos em suspensão à altura h_m e S é o declive do fundo.

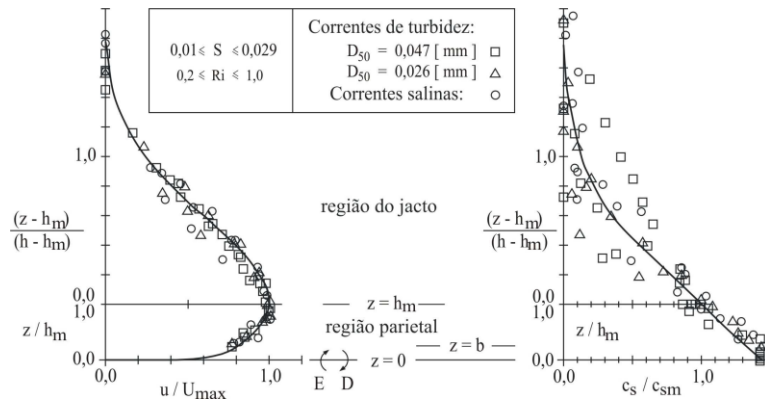


Figura 2.14 – Perfis adimensionais de velocidade e de concentração médios em correntes de turbidez e correntes salinas (in Graf e Altinalkar, 2000).

Verifica-se a semelhança dos perfis de velocidade e de concentração de sedimentos em suspensão entre as correntes de turbidez e as correntes salinas, existindo uma maior dispersão de resultados na parte superior da região exterior.

Ao longo do seu percurso, as correntes de turbidez interagem com o fluido ambiente e com o fundo. A interacção entre a corrente e o fluido ambiente ocorre na interface entre os dois fluidos, consistindo na sua mistura e é responsável pelo aumento gradual da altura média da corrente. Segundo Alves (2008), a velocidade de entrada de fluido ambiente na corrente de turbidez (w_a), é dada por:

$$w_a = E_a U \quad (2.15)$$

onde E_a é o coeficiente de entrada do fluido ambiente na corrente.

A interacção das correntes de turbidez com o fundo pode ser quantificada pelas taxa de erosão (E) e de deposição (D) dadas por:

$$E = w_s E_s \quad (2.16)$$

$$D = w_s c_b \quad (2.17)$$

onde w_s é a velocidade de queda das partículas, c_b a concentração de sedimentos junto ao fundo a uma altura $z = b = 0,05h$, e E_s é o coeficiente de entrada dos sedimentos do fundo em suspensão.

2.5 Escoamento de correntes de turbidez em torno de obstáculos

A utilização de obstáculos no fundo de uma albufeira tem como finalidade desviar ou bloquear de forma total ou parcial as correntes de turbidez, impedindo assim que estas atinjam a zona da barragem e os sedimentos sejam depositados em locais críticos, pondo em causa a sustentabilidade da albufeira. O estudo do comportamento de correntes de turbidez em torno de obstáculos advém principalmente da necessidade de se definir a estratégia de controlo da sedimentação mais adequada e sua correcta implementação na albufeira.

Será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a interacção de correntes de turbidez com um obstáculo isolado, bem como a sua interacção com múltiplos obstáculos.

2.5.1 Obstáculo isolado

No estudo da influência de obstáculos, tal como na modelação matemática de correntes de turbidez, admitem-se várias hipóteses simplificativas, entre elas, o fluido ambiente apresentar uma velocidade nula e uma altura muito superior à da corrente.

Prinos (1999) (*apud* Rossato, 2010), recorrendo a um canal, onde o fluido mais denso se encontrava separado do fluido ambiente, por uma comporta vertical, estudou o efeito da geometria dos obstáculos na interacção com correntes bidimensionais, utilizando obstáculos semicirculares e triangulares com alturas iguais. O autor concluiu não existirem efeitos significativos da geometria no comportamento da corrente.

Oehy (2003) estudou técnicas de bloqueio de correntes de turbidez, tais como obstáculos, jactos de água, telas e cortinas de bolhas colocados no fundo, tendo em vista analisar a sua eficácia no controle da sedimentação em albufeiras. Em Oehy e Schleiss (2007) é estudado a interacção de correntes de turbidez com obstáculos sólidos e permeáveis, e propostas recomendações para o seu projecto baseadas em resultados experimentais e simulações numéricas.

Rossato (2010) investigou a influência de um obstáculo no controlo de correntes de turbidez com base em ensaios experimentais realizados na instalação representada na figura 2.15, onde as correntes de turbidez foram simuladas através da introdução de uma mistura de água e sedimento fino no canal. Caracterizou o escoamento de correntes de turbidez interagindo com um obstáculo, e deu particular atenção à velocidade da frente da corrente, perfis de velocidade média e de concentração de sedimentos, e à altura média da corrente. O autor constatou que após o obstáculo, os perfis de velocidade mantêm a sua forma e que existe uma redução na velocidade máxima e da concentração média de sedimentos em suspensão da corrente.

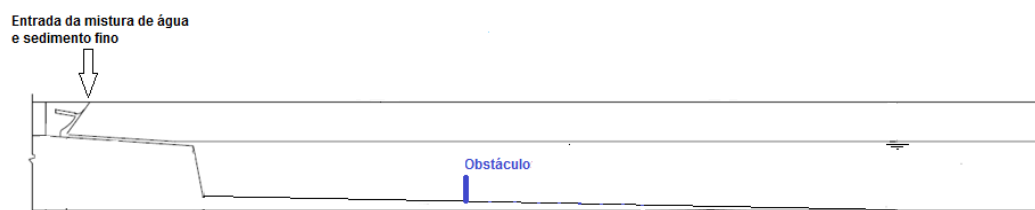


Figura 2.15 – Esquema de ensaio de Rossato (2010) e Rossato e Alves (2011)

Em Rossato e Alves (2011), utilizando a mesma instalação e procedimento experimental de Rossato (2010), e variando a altura do obstáculo, foi verificado que as relações $\frac{h_m}{h}$, $\frac{U_{max}}{U}$ e $\frac{h_r}{h}$ se mantêm constantes a montante e jusante do obstáculo, bem como uma diminuição da velocidade da frente da corrente após o obstáculo, dependente da altura do obstáculo e da concentração de sedimentos em suspensão do escoamento inicial.

Considere-se um fluido ambiente de massa volúmica ρ_a e assumindo a sua velocidade desprezável ($U_a = 0$). Quando uma corrente de turbidez, de massa volúmica ρ_c , velocidade média (U_A) e altura média (h_A), atinge um obstáculo de altura h_{ob} , parte do escoamento pode fluir sobre o obstáculo, desacelerando, enquanto a outra parte do escoamento gera uma onda de retorno tridimensional e de grande complexidade, que se desloca para montante com velocidade U_r . Na figura 2.16 estão identificadas as quatro zonas distintas que ocorrem durante este fenómeno. A zona A correspondente ao escoamento de aproximação, a zona B correspondente às condições a montante do obstáculo onde se encontra a onda de retorno (velocidade média (U_B) e altura média (h_B)), a zona C correspondente às condições no obstáculo (velocidade média (U_C) e altura média (h_C)), e a zona D a jusante do obstáculo (velocidade média (U_D) e altura média (h_D)) do escoamento que transpõe o obstáculo).

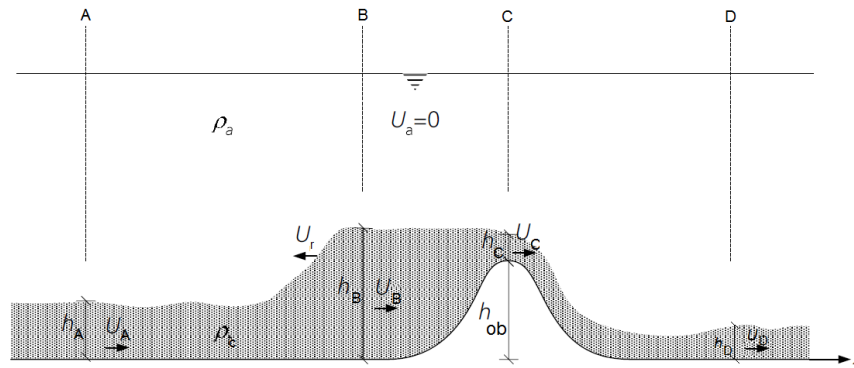


Figura 2.16 – Escoamento de correntes de turbidez sobre um obstáculo (*adaptado de Oehy, 2003*).

O escoamento acima do obstáculo é caracterizado por duas variáveis independentes: o número de Froude densimétrico do escoamento de aproximação ao obstáculo Fr_{dA} , e a relação adimensional $\frac{h_{ob}}{h_A}$ (Oehy, 2003).

A proporção da corrente de turbidez que consegue passar o obstáculo (η) é representada na figura 2.17 e pode ser calculada de acordo com Oehy, (2003) pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{q_C}{q_A} = \frac{\sqrt{g' h_C^3}}{U_A h_A} = \frac{\sqrt{g' (h_B - h_{ob})^3}}{U_A h_A} \quad (2.18)$$

onde q_C é caudal por unidade de largura do escoamento acima do obstáculo e q_A o caudal por unidade de largura do escoamento de aproximação, e g' a aceleração da gravidade reduzida.

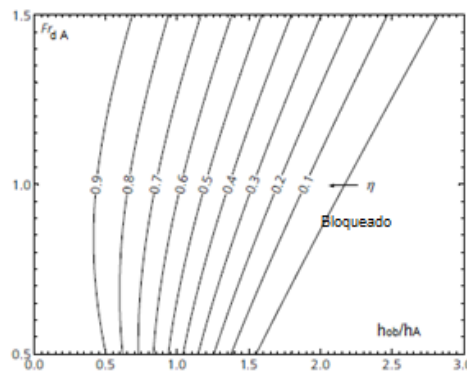


Figura 2.17 – Proporção do escoamento de uma corrente de turbidez que é previsível passar um obstáculo, em função da altura do obstáculo dividida pela altura do escoamento a montante, e do número de Froude a montante (*adaptado de Oehy, 2003*).

A construção deste tipo de estruturas pode ser uma solução interessante a considerar na fase de projecto de uma albufeira uma vez que podem ser construídas com um custo adicional reduzido (Oehy e Schleiss, 2007). Apesar da eficácia no bloqueio de correntes de turbidez, a utilização de apenas um obstáculo na albufeira pode não ser a medida mais indicada a adoptar, uma vez que a cada corrente de turbidez que ocorre na albufeira, a capacidade de armazenamento a montante do obstáculo diminui, até que certo ponto o obstáculo perde a sua capacidade de retenção. Por exemplo, Oehy e Schleiss (2007) referem o estudo da albufeira de Grimsel, onde foi previsto os obstáculos com 20 m de altura perderem a sua capacidade de retenção de sedimentos em aproximadamente 50 anos. Os autores consideram que por vezes o uso de vários obstáculos colocados ao longo da albufeira pode representar uma medida mais sustentável.

2.5.2 Múltiplos obstáculos

A utilização de múltiplos obstáculos no bloqueio total ou parcial de correntes de turbidez é um aspecto ainda pouco estudado. Assim, este ponto da revisão bibliográfica irá reunir informação que possa ser relevante como por exemplo o estudo do efeito da rugosidade em correntes de densidade, e o estudo do efeito de múltiplos obstáculos relacionado com outras áreas, para posteriormente procurar semelhanças e comparar com os resultados obtidos neste estudo experimental.

A influência da rugosidade no comportamento das correntes de turbidez, tal como a influência de múltiplos obstáculos, é um aspecto ainda pouco estudado. No entanto, existem alguns estudos experimentais neste tema, nomeadamente em correntes de densidade salinas. Adduce *et al.* (2009) realizaram num canal rectangular em acrílico, com 3 m de comprimento por 0,3 m de altura e 0,2 m de largura, uma série composta por três ensaios experimentais, onde variaram a rugosidade através da colagem de areia de diferentes diâmetros médios no fundo do canal. A 0,1 m de um dos extremos do canal encontrava-se uma comporta vertical que separava a água (de massa volúmica 1000 kg/m^3) da mistura salina (de massa volúmica 1024 kg/m^3 aproximadamente). Esta comporta era removida subitamente no início de cada ensaio, levando, por diferenças de pressão hidrostáticas, a mistura salina a fluir por baixo da água, formando-se assim uma corrente de densidade. Cada ensaio foi registado através de uma câmara de vídeo CCD ("Charge-Coupled Device") com uma frequência de 25 Hz e a evolução da corrente de densidade ao longo do tempo foi posteriormente determinada utilizando uma técnica de tratamento de imagem. Os resultados obtidos são apresentados na figura 2.18. O ensaio RUN1 apresenta o fundo do canal sem rugosidade, no ensaio RUN2 a rugosidade era de 0,7 mm, e no ensaio RUN3 a rugosidade era de 4,5 mm.

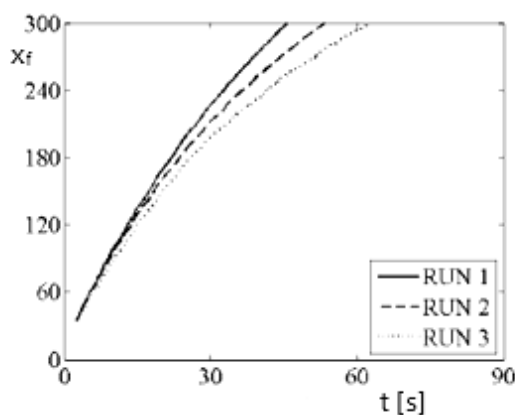


Figura 2.18 – Posição da velocidade da frente ao longo do tempo em todos os ensaios do estudo experimental de Adduce *et al.* (*adaptado de Adduce *et al.*, 2009*).

Os autores definiram três fases diferentes na evolução da velocidade da frente. A primeira fase, onde a frente da corrente se desloca com velocidade constante, a segunda fase, onde consideram que a velocidade embora diferente, é aproximadamente constante, e por fim a terceira fase, onde a velocidade diminui com o decorrer do tempo. Pode concluir-se que quanto maior é a rugosidade do fundo, maior é a redução da velocidade da frente da corrente. Constatase ainda que à medida que o tempo decorre, maior é essa redução de velocidade.

Utilizando uma instalação também composta por um canal rectangular dividido por uma comporta vertical, La Rocca *et al.* (2008) realizaram dez ensaios experimentais utilizando dois valores de densidade para o fluido mais denso, e cinco diferentes valores de rugosidade, chegando a conclusões semelhantes às de Adduce *et al.* (2009), relativamente à influência da rugosidade na velocidade da frente da corrente. No entanto, ao contrário de Adduce *et al.* (2009),

apenas consideraram duas fases diferentes da evolução da velocidade da frente. A primeira fase, onde a frente da corrente se desloca com velocidade aproximadamente constante e não existe uma influência visível da rugosidade, e a segunda fase, onde a velocidade da frente diminui. Nesta segunda fase constataram que os gráficos da evolução da velocidade da frente, adimensionalizada em relação aos dois diferentes valores de densidade do fluido utilizados, colapsam numa única curva. Além disso, é nesta última fase onde a rugosidade aparenta ter mais influência na velocidade da frente da corrente pois foi onde os diferentes valores de rugosidade utilizados apresentaram valores diferentes de redução da velocidade da frente.

Peters e Venart (2000) estudaram o efeito da rugosidade em correntes salinas. Os autores utilizaram três diferentes valores de densidade da corrente e cinco diferentes valores de rugosidade. A rugosidade era simulada através de elementos de secção quadrada, colocados ao longo do fundo do canal (de dimensões 2,4 m de comprimento, 0,2 m de largura e 0,3 m de altura), com um espaçamento igual à largura da secção dos elementos. Os autores concluíram que o comportamento da corrente de densidade depende significativamente da rugosidade utilizada, devido ao aumento da superfície de atrito entre o fundo e a corrente, e à mistura entre a corrente e o fluido ambiente que ocorre nos espaços vazios entre os elementos que simulavam a rugosidade (ver figura 2.19).

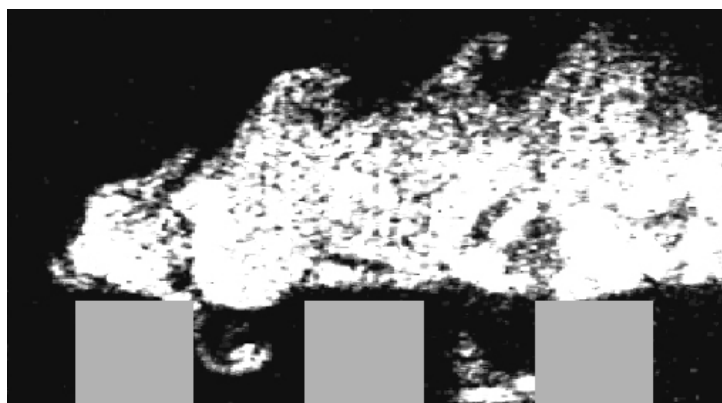


Figura 2.19 – Deslocamento da corrente de densidade ao longo dos elementos de secção quadrada (*in* Peters e Venart, 2000).

A mistura que ocorre na zona do espaçamento entre os elementos, provoca uma diluição adicional na cabeça da corrente, que não acontece em fundos com superfícies lisas. Esta diluição tende a ser maior com o aumento da densidade da corrente, pois a corrente tem maior tendência em ocupar o interior dos espaços entre os elementos, forçando o fluido ambiente a deslocar-se, ocorrendo assim a mistura dessa porção de fluido ambiente com a cabeça da corrente.

O estudo do efeito de múltiplos obstáculos é também alvo de estudos em escoamentos não estratificados como por exemplo nos escoamentos de superfície livre e na atmosfera. Na atmosfera o exemplo mais comum é o estudo do comportamento do vento em zonas urbanas, onde neste caso, os edifícios podem ser entendidos como múltiplos obstáculos.

Observe-se a figura 2.20. Nela é representado um esquema dos regimes de escoamento (relativo ao vento) que podem processar-se na presença de múltiplos obstáculos de altura h_{ob} e em função do seu espaçamento L .

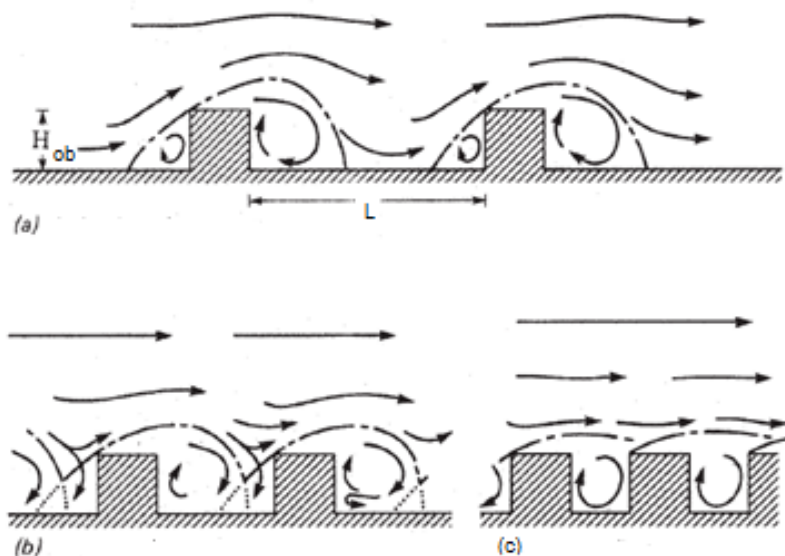


Figura 2.20 – Regimes de escoamento acima dos obstáculos: a) escoamento sobre obstáculos isolados; b) *wake-interference flow*; c) *escoamento deslizante sobre turbilhões*, (in Hanna e Britter, 2002).

O regime de escoamento sobre obstáculos isolados ocorre quando os obstáculos têm entre si uma distância suficiente de modo ao topo do primeiro obstáculo (a montante) não criar perturbações no escoamento que se verifiquem ainda na zona do obstáculo seguinte (a jusante). Segundo Hanna e Britter (2002), em geral, quando o espaçamento entre os obstáculos é três a cinco vezes maior do que a altura do primeiro obstáculo, estas perturbações não ocorrem e estamos na presença do regime de escoamento sobre obstáculos isolados. Se os obstáculos forem espaçados de uma a três vezes a altura do primeiro obstáculo, então o topo deste obstáculo irá interagir fortemente com o obstáculo seguinte e estamos na presença do regime “*wake-interference*”. Quando os obstáculos estão todos espaçados de um comprimento inferior à sua altura, então o escoamento processa-se praticamente na parte superior dos obstáculos, e estamos na presença do regime de *escoamento deslizante sobre turbilhões*. O regime “*wake-interference*”, de um modo geral, conduz a um efeito maior da rugosidade no escoamento do que o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões, pois induz uma maior perturbação ao escoamento.

Pérez-Jiménez *et al.* (2008), com a finalidade de verificar a influência da presença de obstáculos na ocorrência de explosões no interior de um espaço fechado, por exemplo durante um incêndio, estudaram o efeito de múltiplos obstáculos em correntes de densidade, originadas pelo escoamento de gás natural (98% de metano) no interior de um contentor metálico de dimensões 5,5 m de comprimento, 2,2 m de largura e 2,2 m de altura. Foram estudados os casos sem obstáculos, e com obstáculos escolhidos com uma altura de forma a criar um ressalto hidráulico na corrente de densidade. Alguns dos resultados obtidos são mostrados na figura 2.21, onde se pode observar a posição instantânea da massa da corrente de densidade (de metano), obtida para os instantes de tempo $t = 4,2$ s e $t = 10,2$ s para o caso sem obstáculos (a) e c)) e para o caso com obstáculos (b) e d)).

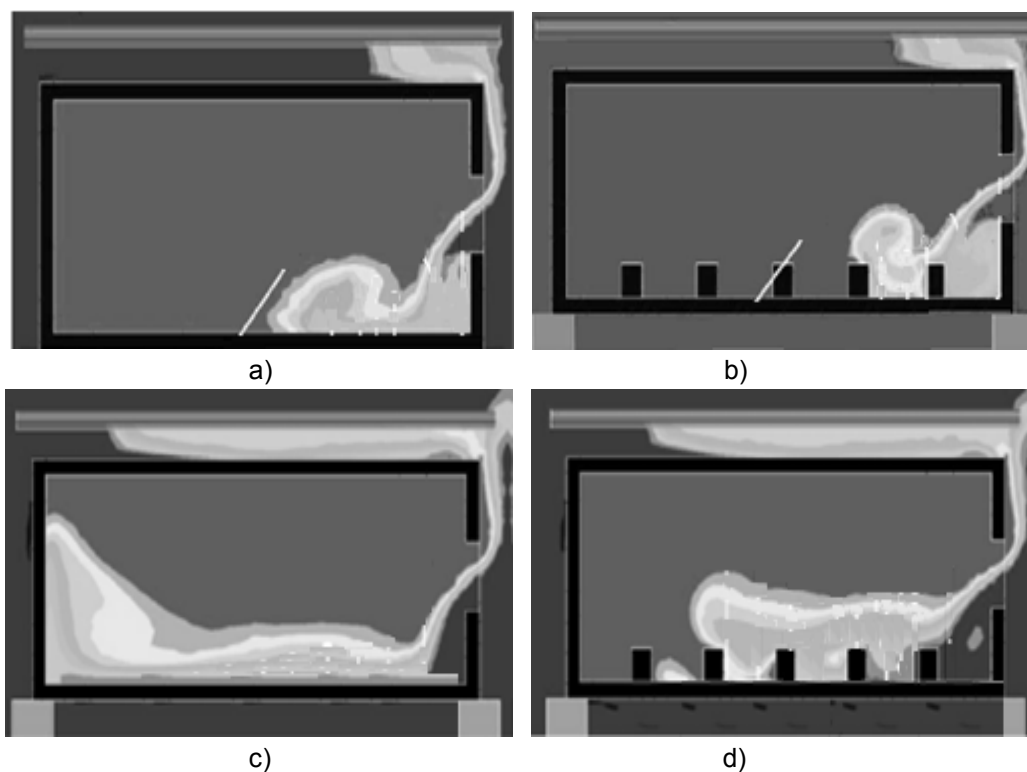


Figura 2.21 – Localização instantânea da corrente de densidade nos casos: a) sem obstáculos, $t = 4,2s$; b) com obstáculos, $t = 4,2s$; c) sem obstáculos, $t = 10,2s$; d) com obstáculos, $t = 10,2s$, (*modificado de Perez-Jimenez et al., 2008*).

Os autores observaram que no caso com obstáculos, existe a formação de ressalto hidráulico e de vórtices de maiores dimensões comparativamente ao caso sem obstáculos, e concluíram que a presença de obstáculos e a sua distribuição, podem alterar significativamente a estrutura da corrente, a taxa de mistura e a velocidade média da corrente de densidade.

3 Instalação, equipamento e procedimento experimental

3.1 Introdução

Os ensaios experimentais pretendem simular em laboratório, correntes de turbidez de fundo, e analisar a sua interacção com vários obstáculos de igual dimensão colocados ao longo do fundo do canal, fazendo variar a concentração de sedimentos em suspensão e o número de obstáculos colocados. Para isso foram efectuadas medições de perfis de velocidades em várias secções, velocidade da frente da corrente, e recolhidas amostras da corrente para posterior determinação das concentrações de sedimentos em suspensão.

Os ensaios foram realizados numa instalação representativa de um trecho de rio afluente a uma albufeira, construída especificamente para estudos de correntes de turbidez (Alves, 2008), (Rossato, 2010) e (Rossato e Alves, 2011), localizada no pavilhão de hidráulica fluvial do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC.

A determinação das concentrações de sedimentos em suspensão foi realizada na estação experimental de sedimentos coesivos (EESC) do laboratório de sedimentologia no Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC. O procedimento consistia na filtragem e posterior determinação do peso seco dos sedimentos contidos em cada amostra retirada no ensaio experimental.

3.2 Instalações laboratoriais

A instalação utilizada para a simulação de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos, é composta por um canal de ensaios (Figuras 3.1 e 3.2), um tanque para a mistura da água e os sedimentos (Figura 3.3) e por um circuito hidráulico de ligação do tanque ao canal (Figura 3.4).

O canal apresenta as seguintes dimensões: 16,45 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,75 m de altura máxima. As paredes são em acrílico na parte frontal para permitir a visualização dos ensaios, e o fundo exibe 4 declives diferentes ao longo deste. O primeiro, com 4,74 m de comprimento e declive 0,014 simula o trecho de escoamento de um rio afluente a uma albufeira, e o segundo, uma rampa fazendo 30° com a horizontal simula o delta de deposição. Seguem-se um troço com 8m de comprimento e declive 0,014, e um troço horizontal com 3,75 m.

Na zona de jusante do canal existe uma comporta com um descarregador e uma válvula de drenagem com saída para o esgoto, para permitir não só o esvaziamento do canal no final, mas também manter constante o nível da água no canal durante o decorrer do ensaio.



Figura 3.1 – Canal de ensaios da instalação laboratorial.

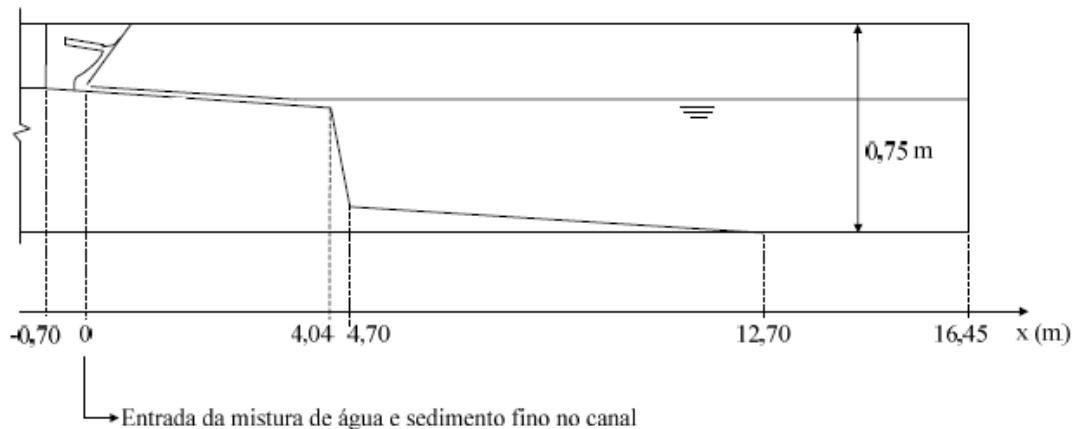


Figura 3.2 – Perfil longitudinal do canal de ensaios (*adaptado de Alves, 2008*).

O tanque de mistura tem $3,1 \text{ m}^3$ de capacidade máxima. Possui uma válvula de drenagem e um misturador mecânico no seu interior para auxiliar a manutenção dos sedimentos em suspensão durante todo o ensaio.



Figura 3.3 – Tanque de mistura da instalação laboratorial.

O circuito hidráulico é constituído por dois troços de tubagem, duas válvulas de corte, e uma válvula de regulação. O primeiro troço liga o tanque de mistura ao canal, e o segundo troço faz voltar a mistura de novo ao tanque enquanto não se inicia o ensaio. Ambos os troços são compostos por tubagens dimensionadas de forma a assegurar velocidades elevadas para a gama de caudais utilizados, e assim evitar a deposição de sedimentos no seu interior.

Através de uma bomba, a mistura é conduzida do tanque para o primeiro troço do circuito hidráulico, onde o seu caudal é medido através de um caudalímetro, e regulado pela primeira válvula colocada a jusante deste. As duas restantes válvulas de corte no circuito, destinam-se a alternar esse caudal, entre o segundo troço do circuito hidráulico e canal de ensaios, onde é introduzido através de um difusor, contra uma placa inclinada de forma a reduzir a velocidade e uniformizar o escoamento na entrada de água do canal.



Figura 3.4 – Circuito hidráulico da instalação laboratorial.

No anexo 3 pode ver-se a instalação laboratorial em planta e em corte.

3.3 Equipamento

3.3.1 Equipamento utilizado nos ensaios de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos

i. Medição dos perfis de velocidade

Na medição dos perfis de velocidade da corrente de turbidez foi utilizado o sistema UVP (ultrasound velocity profiling).

O sistema UVP é um instrumento capaz de medir simultaneamente um elevado número de perfis de velocidades em diferentes secções do escoamento. O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de impulsos de ultra-sons (ou pulsos de onda) ao longo de um eixo de medição, que ao atingirem as partículas no fluido, são reflectidos e voltam ao dispositivo. É medido o tempo entre a emissão e a recepção destes impulsos, bem como a sua frequência, permitindo ao sistema determinar a frequência de desvio entre as ondas emitidas e reflectidas, designada por frequência de Doppler. A partir desta frequência, o sistema UVP calcula a distância das partículas ao ponto de emissão dos impulsos (transdutor) e as suas respectivas velocidades.

Para a obtenção do perfil de velocidades, o sistema UVP calcula as velocidades do escoamento em pequenas regiões designadas por células de medição ou “Channel”, ao longo do feixe de emissão acústico. A dimensão reduzida das células de medição faz com que se admita que a velocidade média obtida, é representativa da velocidade de todas as partículas nelas contidas.

Nas figuras 3.5 e 3.6 é representado esquematicamente o funcionamento deste equipamento, onde θ é o ângulo que o feixe acústico do transdutor faz com o plano horizontal, u é a velocidade

da partícula na direcção principal do escoamento e u_x é a velocidade da partícula segundo o eixo do feixe acústico.

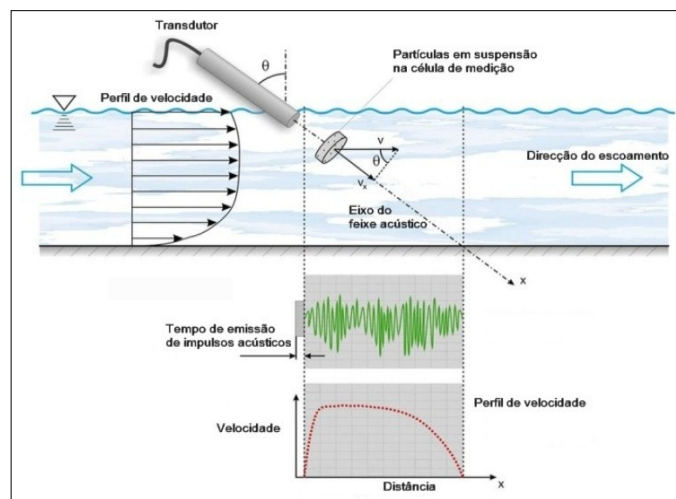


Figura 3.5 – Representação esquemática da medição de perfis de velocidade de um escoamento em superfície livre com o sistema UVP (in Alves, 2008).

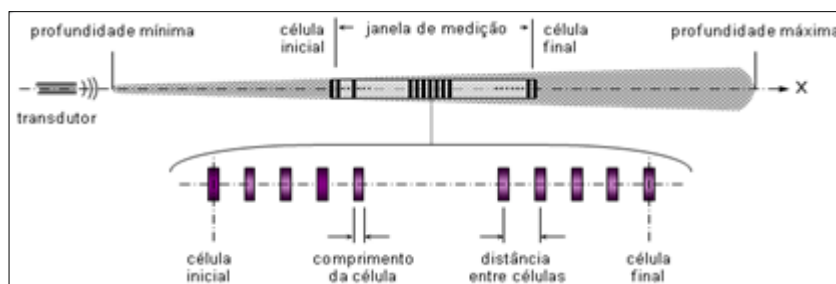


Figura 3.6 – Representação esquemática da janela de medição do sistema UVP (in Alves, 2008).

O sistema UVP da MET-FLOW é composto pela unidade UVP-DUO, pelos transdutores, e pelo software de interface com o utilizador (Figura 3.7). A descrição e especificações detalhadas do equipamento são apresentadas em MET-FLOW (2002). Neste estudo experimental foram utilizados seis transdutores (T1, T2, T3, T4, T5 e T6)

De acordo com o fabricante, os erros associados à medição das velocidades são da ordem dos 5%.

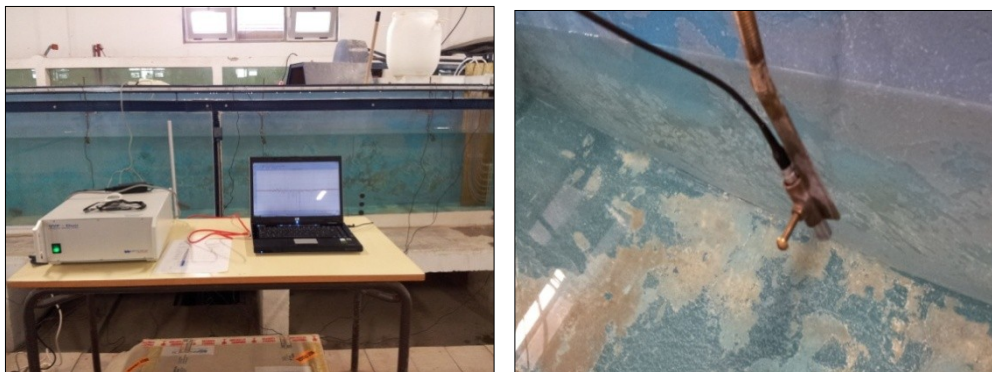


Figura 3.7 – Componentes do sistema UVP.

Os parâmetros do UVP (Quadro 3.1), foram estabelecidos com base em testes realizados, de forma a melhor se ajustarem ao fluido e às condições do escoamento, mas também garantirem a melhor qualidade possível do sinal.

Quadro 3.1- Parâmetros UVP adotados nos ensaios

Grupo de parâmetros	Parâmetros	Valor
Meio	Velocidade de propagação acústica	1480 m/s
Escoamento	Profundidade máxima do escoamento	570,17 mm
	Gama de velocidades	-120,1 mm/s a 119.1 mm/s
	Resolução da velocidade no eixo	0,938 mm/s
Sinal	Frequência de emissão	4MHz
	Número de ciclos por transdutor	8
	Número de repetições	64
	Filtro do ruído	8
Janela de medição	Número de células	378
	Comprimento da célula	1,48 mm
	Distância entre células	1,48 mm
	Distância da célula inicial ao transdutor	8,14 mm
	Distância da célula final ao transdutor	569,06 mm
Amostragem	Período de amostragem de cada perfil	73 ms
	Número de perfis	Variável (>800 por transdutor)
	Frequência de repetição do pulso	1,29786 kHz
	Ângulo de incidência do feixe do transdutor	20°
Voltagem	Voltagem	90 V
Amplificação do eco	Amplificação inicial	4
	Amplificação final	8

ii. Caudalímetro

Equipamento utilizado na medição do caudal de entrada da mistura de água e sedimento fino (Q_c) no canal de ensaios. O caudalímetro (Figura 3.8) foi calibrado no Laboratório de Ensaios Hidráulicos do LNEC, para uma gama de caudais entre 0,5 l/s e 1,5 l/s sendo o erro máximo associado às leituras inferior a 5%.



Figura 3.8 – Caudalímetro.

iii. Sistema de recolha de amostras de água e sedimentos em suspensão da corrente.

Para determinar o perfil de concentrações em duas secções do canal, procedeu-se à recolha de amostras da mistura de água e sedimento fino recorrendo a dois sistemas iguais, composto cada um, por uma placa metálica, onde estavam montadas oito tomadas de extracção horizontais constituídas por tubos de plástico rígido de 4 mm de diâmetro, e ligadas a tubos de plástico flexível de 5 mm de diâmetro (Figura 3.9). A sua configuração não interfere com a corrente de turbidez, Alves (2008).

Estes sistemas são colocados em duas secções do canal, de acordo com o esquema de ensaios, e as amostras colhidas são posteriormente armazenadas em recipientes de plástico de 500 ml de capacidade, devidamente identificados com o nome do ensaio, data, as siglas M e J, consoante o sistema de recolha se situar respectivamente a montante ou jusante dos obstáculos, e com os números de 1 a 8, de acordo a altura em relação ao fundo da tomada, (Quadro 3.2). O sistema de recolha de montante posicionava-se no canal na secção do transdutor T2 e o sistema de jusante na secção do transdutor T5.

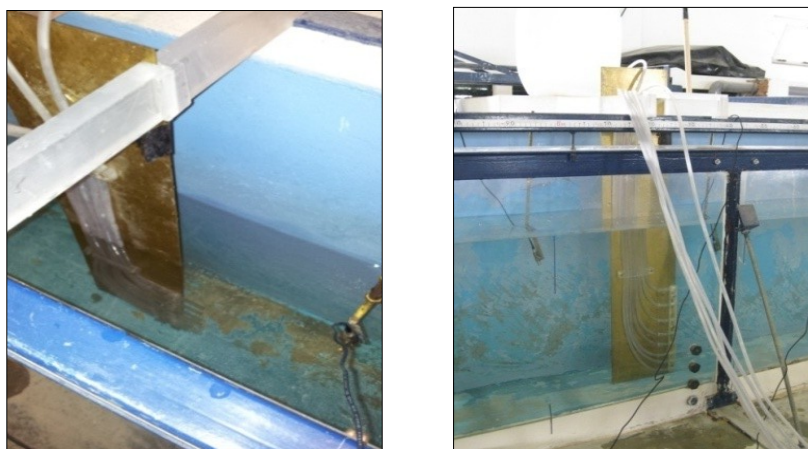


Figura 3.9 – Sistema de recolha de amostras.

Quadro 3.2 -Posição das diferentes tomadas dos sistemas de recolha de amostras de água e sedimentos no interior do canal

Distância ao fundo (mm)	M	J
10	1	1
35	2	2
60	3	3
120	5	5
160		6
205	7	7
250	8	

iv. Bomba

Bomba submersível com 1,2 CV de potência (Figura 3.10), utilizada para a introdução no circuito hidráulico da mistura de água e sedimentos contida no tanque de mistura e, posteriormente, para o canal de ensaios.

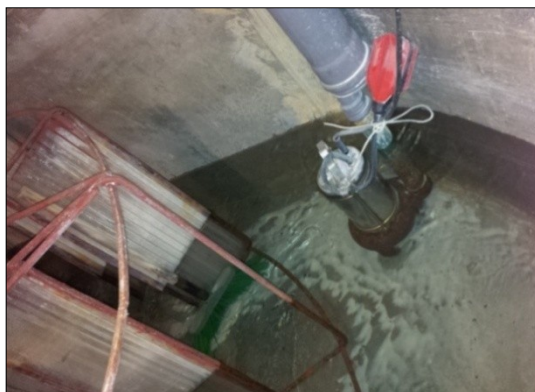


Figura 3.10 - Bomba submersível.

v. Termómetro de mercúrio

Utilizado para a medição e controlo da temperatura da água do canal e da água do tanque de mistura por forma a assegurar que a corrente gerada se deve apenas à diferença de densidades provocada pelos sedimentos em suspensão e não, simultaneamente, com a diferença de temperatura entre os dois líquidos.

vi. Hidrómetro e régua graduada

Equipamentos utilizados na medição do nível da superfície livre da água no canal de ensaios e no tanque de mistura. A régua graduada foi utilizada para a medição do nível da água no tanque de mistura, enquanto o hidrómetro (Figura 3.11) estava colocado no canal de ensaios, e apresentava um erro de medição de cerca de $\pm 0,1$ mm.



Figura 3.11 – Hidrómetro.

vii. Cronómetro

Utilizado para a medição de intervalos de tempo para a determinação da velocidade média da frente da corrente ao longo do canal de ensaios.

3.3.2 Equipamento utilizado na determinação das concentrações de sedimentos em suspensão na corrente

A determinação das concentrações de sedimentos em suspensão foi realizada recorrendo ao seguinte equipamento:

i. Sistema de filtração

O sistema de filtração é constituído por um filtro, uma bomba de vácuo, pelos copos de filtração e pelo kitassato. Este sistema permite separar as partículas sólidas da água das amostras recolhidas nos ensaios.

ii. Filtros

Os filtros utilizados neste trabalho experimental, da marca Whatman, são constituídos por membranas de nitrato-celulose de capacidade de retenção de partículas de diâmetro igual ou superior a $0,45\ \mu\text{m}$. Utilizaram-se filtros com 0,47 mm e 0,90 mm de diâmetro consoante a maior ou menor concentração de sedimentos.

iii. Estufa

Equipamento utilizado na secagem das partículas retidas nos filtros para a posterior determinação do seu peso seco. A temperatura da estufa situava-se entre os 40 e os 45°C.

iv. Exsicador

Recipiente de vidro fechado, que contem no seu interior sais de sílica gel, utilizado para guardar os filtros, com ou sem partículas, após a saída da estufa até as suas temperaturas igualarem a temperatura ambiente, impedindo desta forma que absorvam humidade, e que posteriormente possam ser pesadas. A sílica gel deverá estar seca, e apresentar uma coloração azul para que possa absorver a água dentro do exsicador.

v. Balança digital

Equipamento utilizado na pesagem das amostras, filtros e caixas de petri. Calibrada para operar numa gama de valores entre 10 mg e 220 g, com um erro associado de 1 mg.

vi. Proveta graduada

Recipiente de vidro com 500 ml de capacidade, graduado, destinado à medição do volume de água das amostras recolhidas nos ensaios.

vii. Caixas de petri, pinça, espátula, e esguicho com água

Acessórios auxiliares durante o processo de filtração.

Na figura 3.12 observa-se todo o equipamento utilizado na determinação da concentração de sedimentos em suspensão na corrente



Figura 3.12 – Equipamento de filtração: a) Sistema de filtração, proveta graduada e esguicho com água; b) Balança digital, filtros, caixas de petri, pinça e espátula; c) Estufa; d) Exsicador.



c)



d)

Figura 3.12 (continuação) - Equipamento de filtração: c) Estufa; d) Exsicador

3.4 Sedimentos

Na simulação de correntes de turbidez utilizou-se um sedimento fino, designado por farinha de sílica. A escolha deste material deve-se sobretudo ao facto deste não se depositar rapidamente no fundo do tanque de mistura, e assim possibilitar obter uma concentração de sedimentos em suspensão aproximadamente constante durante o ensaio. Além disso, a inexistência de coesão entre as partículas deste sedimento, permitia mais facilmente uma mistura homogénea. O diâmetro mediano deste material era de $D_{50} = 20 \mu m$, massa volúmica $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, e apresentava a curva granulométrica representada na figura 3.13.

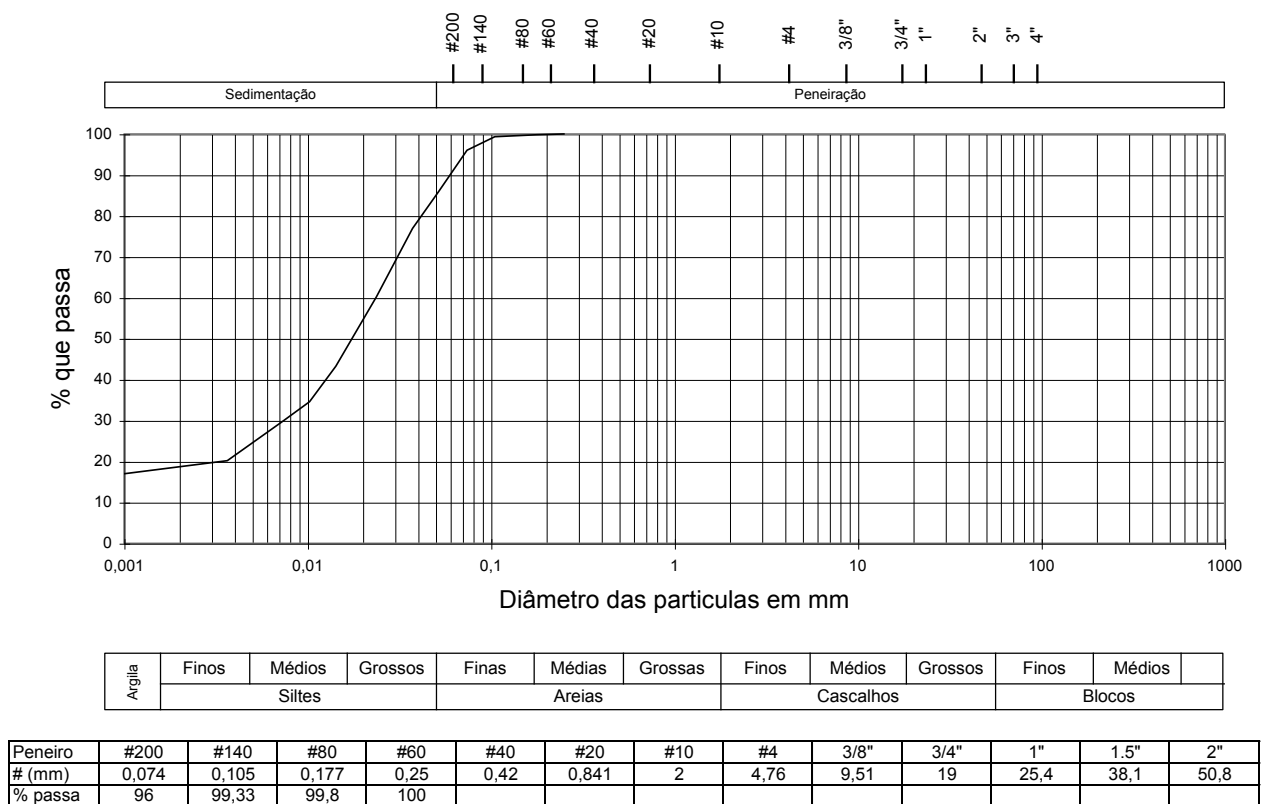


Figura 3.13 – Curva granulométrica do material utilizado (extraído de Alves, 2008).

3.5 Obstáculos

Os obstáculos utilizados nos ensaios, de dimensões 0,30 m de largura por 0,05 m de altura, foram obtidos através do corte de uma placa de acrílico com 9 mm de espessura. Os obstáculos eram fixados ao canal com a ajuda de cunhas de madeira, e colocados nas secções definidas consoante o esquema de ensaios.

3.6 Procedimento experimental

3.6.1 Simulação de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos

A simulação de correntes de turbidez com múltiplos obstáculos em laboratório foi realizada de acordo com o seguinte procedimento:

- Enchimento do tanque de mistura com água limpa até ao nível desejado.
- Ligação do caudalímetro e da bomba, tendo o cuidado de assegurar que as válvulas do circuito hidráulico se encontravam abertas e permitiam a entrada da água do tanque de mistura para o canal de ensaios. Esta tarefa destinava-se a limpar a tubagem de vestígio de sedimentos de ensaios anteriores, por forma a não afectar a frente da corrente do presente ensaio, pela diferença de concentrações com o ensaio anterior. Este efeito mais seria sentido quanto maior fosse a diferença de concentrações entre os dois ensaios.
- Manobra das válvulas de corte do circuito hidráulico de modo a impedir a entrada de água no canal de ensaios, e a permitir o circuito fechado da água no tanque de mistura. Posteriormente o caudal seria regulado através do fecho/abertura da válvula de regulação, até ao valor pretendido e registado o seu valor lido no caudalímetro.
- Limpeza do canal de ensaios para remover a mistura de água e sedimentos decorrente de b), bem como de poeiras e sujidades nas paredes do canal que poderiam afectar a densidade do fluido ambiente e consequentemente o ensaio.
- Enchimento do canal de ensaios com água limpa até ao nível desejado.
- Montagem do sistema UVP (Figura 3.14): Colocação dos transdutores nas posições definidas para cada ensaio, e paralelamente ao escoamento. Ligação da unidade UVP-DUO a um computador, inserção dos parâmetros UVP e verificação do seu funcionamento.

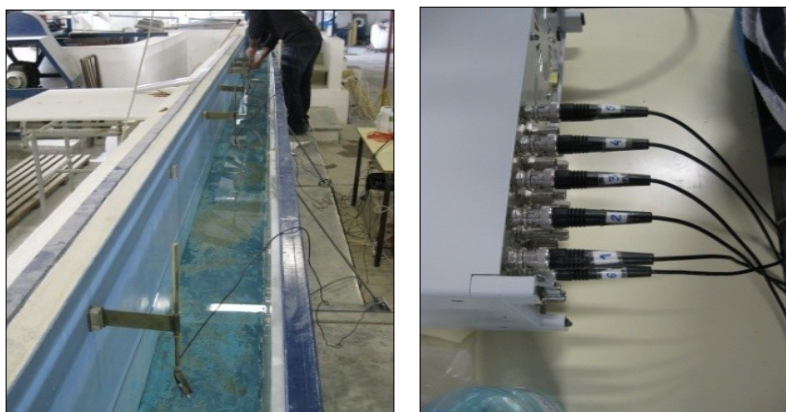


Figura 3.14 – Montagem do equipamento UVP.

- g) Colocação do sistema de recolha de amostras de água e sedimentos perto das posições dos transdutores T2 (secção de montante) e T5 (secção de jusante), certificando que as tomadas de água se encontravam longe do feixe dos transdutores de modo a não afectar a velocidade da corrente nesses pontos. Aspiração do ar dos tubos flexíveis, de modo a criar uma depressão no seu interior, iniciando assim o escoamento.
- h) Fixação ao canal dos obstáculos com a ajuda de cunhas de madeira (Figura 3.15), nas posições definidas para cada ensaio.



Figura 3.15 – Obstáculo posicionado no canal de ensaios.

- i) Medição e registo dos valores da temperatura e do nível da água no canal de ensaios, e no tanque de mistura.
- j) Mistura dos sedimentos num recipiente com água, com a ajuda de um misturador (Figura 3.16), de modo a garantir uma boa homogeneização e sua posterior colocação no tanque de mistura. Esta operação apenas seria efectuada quando todos os passos do procedimento fossem concluídos, de modo a evitar que os sedimentos mais pesados assentassem no fundo antes de se começar o ensaio.



Figura 3.16 – Mistura dos sedimentos antes da sua colocação no tanque de mistura.

- k) Manobra simultânea das duas válvulas de corte do circuito hidráulico de modo a introduzir a mistura de água e sedimentos no canal, iniciando-se o ensaio. Registo das posições da frente da corrente ao longo do tempo com um cronómetro, bem como a recolha das amostras de sedimentos em suspensão na corrente. As amostras eram recolhidas não só nos sistemas de recolha, como também à entrada do canal para a determinação da concentração volumétrica inicial de sedimentos em suspensão. Neste caso, eram recolhidas duas amostras (designadas por C1 e C2), uma no início e outra a meio do ensaio.
Regulação da válvula de drenagem do canal, de modo a manter o nível da água no canal, constante durante todo o ensaio.

3.6.2 Determinação das concentrações de sedimentos

Para cada amostra recolhida nos ensaios, seguiu-se o seguinte procedimento para a determinação das concentrações de sedimentos em suspensão:

- a) Colocação do filtro e sua caixa de petri respectiva, na estufa a uma temperatura situada entre 40 e os 45°C, durante cerca de 10 a 15 minutos, para perderem a humidade.
- b) Determinação do volume das amostras com uma proveta graduada de 500 ml.
- c) Numeração e registo do peso de cada filtro. Colocação do filtro no equipamento de filtração.
- d) Início do processo de filtração, ligando a bomba de vácuo, e transferindo a amostra para o copo de filtração.
- e) Remoção do filtro com os sedimentos retidos do equipamento após o fim do processo de filtração, e colocação deste na caixa de petri onde seria deixado na estufa a uma temperatura entre 40 a 45 °C, durante cerca de dois dias para perder a totalidade da água.
- f) Colocação das amostras no exsiccador durante cerca de 10 minutos
- g) Medição e registo do peso seco total do conjunto caixa de petri, filtro e sedimentos filtrados, e do peso somente da caixa de petri.
- h) Colocação do filtro e sedimentos dentro de uma pequena bolsa plástica, previamente identificada para cada amostra.

3.7 Processamento e análise de dados

A qualidade dos perfis obtidos com o sistema UVP depende essencialmente do fluido utilizado, da adequação dos parâmetros de medição, das características dos transdutores e do respectivo ângulo de incidência (Alves, 2008). No entanto, os perfis de velocidade medidos podem apresentar desvios relativamente aos perfis de velocidade reais (ruído), originados pelo próprio funcionamento do sistema UVP.

Os dados fornecidos pelo sistema UVP necessitam de ser tratados de forma a eliminar esse ruído. O processo do tratamento de dados está dividido em duas partes fundamentais.

A primeira parte consiste em exportar os dados fornecidos pelo sistema UVP, e reorganizá-los na forma matricial utilizando um programa escrito em Fortran90, onde o ficheiro resultante é gravado no formato de texto.

Na segunda parte efectua-se o tratamento dos dados utilizando uma rotina de MATLAB desenvolvida no LNEC por Gonzales (2007), que utiliza a seguinte metodologia:

- a) Escolha do transdutor a ser analisado.
- b) Identificação da posição do fundo do canal. O sistema UVP não identifica com precisão a posição do fundo do canal, onde a velocidade é zero, sendo por isso necessário definir a janela de medição.
- c) Escolha do intervalo de tempo para o cálculo do perfil de velocidades médio. Pretende-se obter um perfil de velocidades médio nas várias secções, representativo das velocidades no corpo da corrente antes e após os obstáculos. Desta forma, o tempo final a considerar nos transdutores T3, T4, T5 e T6 será o tempo final das medições do ensaio feitas pelo sistema UVP. Para os transdutores T1 e T2, devido à presença dos obstáculos, o intervalo de tempo foi mais reduzido, utilizando-se como tempo final, aproximadamente o instante em que a corrente de retorno provocada pela presença dos obstáculos chega a estes transdutores.

Em todos os transdutores, o tempo inicial que se considerou foi o instante em que a corrente se tornava mais estável, após a passagem pelo respectivo transdutor.

- d) Filtragem dos perfis, onde foi efectuada uma exclusão dos perfis afectados pelas fontes de ruído (Figura 3.17), de acordo com Alves (2008), ajustando os perfis de velocidade a um polinómio de grau $n = 7$. Assim, para cada perfil é calculado um número S de ocorrências que verificam:

$$a_k \geq \mu_k + \sigma_k \text{ ou } a_k \leq \mu_k - \sigma_k, k = 0 \dots n.$$

onde a_k são os coeficientes do polinómio de grau n , μ_k é o valor médio e σ_k o desvio padrão do conjunto de coeficientes $\{a_k\}$ obtidos para cada perfil de velocidade. Se o valor de S é maior ou igual do que o valor definido $S_{CR} = 4$ então esse perfil é descartado.

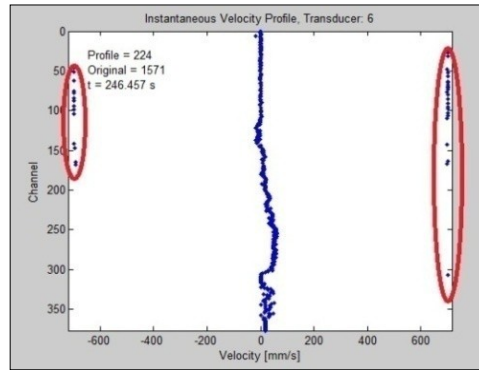


Figura 3.17 – Representação da metodologia utilizada na filtração dos perfis de velocidade.

4 Análise de resultados

4.1 Introdução

No presente estudo experimental foram realizados nove ensaios, onde se manteve constante a geometria do canal e o caudal inicial da mistura de água e sedimento, de valor $Q_{c0} = 0,7 \text{ l/s}$, o nível de água no interior do canal ($H = 54 \text{ cm}$) e o tipo de sedimento utilizado (de diâmetro mediano $D_{50} = 20 \mu\text{m}$). Os ensaios experimentais estão divididos em três séries de acordo com o número de obstáculos colocados no canal (três, cinco e nove obstáculos), sendo cada série composta por três ensaios, numerados por ordem crescente da concentração volumétrica inicial de sedimentos em suspensão (C_{s0}). Na figura 4.1 é representado o esquema de ensaios de cada uma das séries (S1, S2 e S3), onde se pode ver a posição de cada transdutor e do trecho de obstáculos em relação à entrada do canal. A distância entre os obstáculos nas séries S1, S2 e S3 era de respectivamente 1 m, 0,5 m e de 0,25 m.

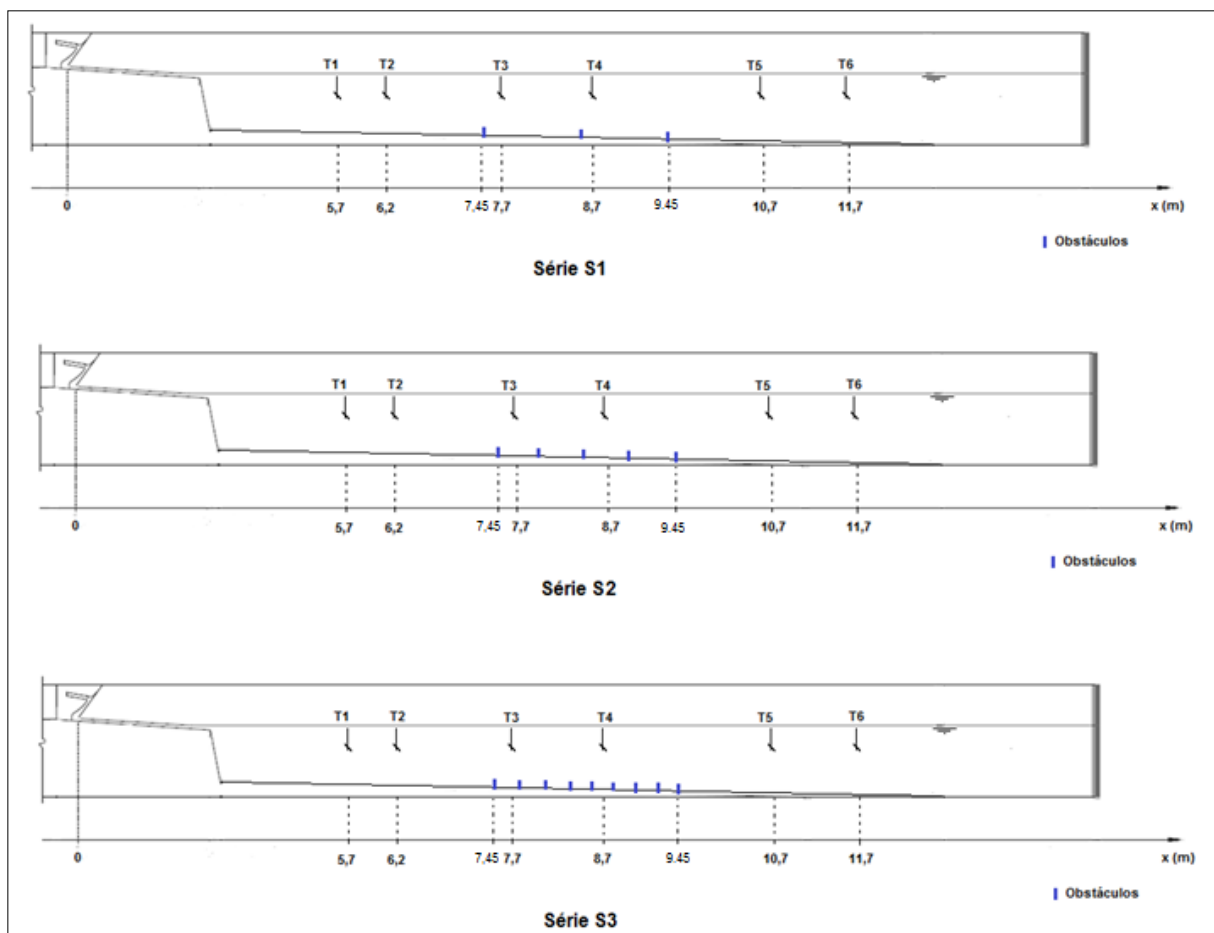


Figura 4.1 – Esquema de ensaios das series S1, S2 e S3

Refira-se que os transdutores T3 e T4 apenas foram utilizados nos ensaios S1-1, S3-1 e S3-3. No ensaio S3-2 não foram realizadas medições com o sistema UVP nem de perfis de concentração de sedimentos em suspensão.

No quadro 4.1 são apresentados os valores da concentração volumétrica inicial de sedimentos em suspensão (C_{s0}) utilizados em cada ensaio. Estes foram obtidos fazendo a média

dos valores de cada amostra (C1 e C2) colhidas à entrada do canal de ensaios no início e a meio de cada ensaio.

Quadro 4.1 - Concentração volumétrica dos sedimentos em suspensão inicial dos ensaios.

Ensaio	Amostra	Concentração volumétrica (%)	C_{s0} (%)
S1-1	C1	0,1132	0,0949
	C2	0,0765	
S1-2	C1	0,1914	0,1997
	C2	0,2079	
S1-3	C1	0,5167	0,5367
	C2	0,5568	
S2-1	C1	0,0932	0,1038
	C2	0,1143	
S2-2	C1	0,1929	0,1871
	C2	0,1813	
S2-3	C1	0,3654	0,3819
	C2	0,3984	
S3-1	C1	0,0932	0,1009
	C2	0,1086	
S3-2	C1	0,1629	0,1629
	C2		
S3-3	C1	0,4079	0,3901
	C2	0,3724	

São apresentados no quadro 4.2 os valores das variáveis das condições iniciais de cada ensaio, nomeadamente o caudal inicial da mistura de água e sedimento (Q_{c0}), a concentração de sedimentos em suspensão inicial (C_{s0}), a temperatura da água no tanque e no canal de ensaios, respectivamente T_c e T_a . Estes valores são utilizados para o cálculo de parâmetros iniciais dos ensaios.

Quadro 4.2 - Condições iniciais dos ensaios.

Ensaio	Q_{c0} (l/s)	C_{s0}		T_c (°C)	T_a (°C)
		(%)	(g/l)		
S1-1	0,70	0,095	2,515	16,5	16,0
S1-2	0,70	0,200	5,291	21,0	20,0
S1-3	0,70	0,537	14,223	20,5	20,0
S2-1	0,70	0,104	2,750	21,5	21,0
S2-2	0,71	0,187	4,959	21,0	21,0
S2-3	0,70	0,382	10,120	21,0	21,0
S3-1	0,70	0,101	2,674	16,5	16,0
S3-2	0,70	0,163	4,317	16,5	16,0
S3-3	0,70	0,390	10,339	16,0	16,0
Máximo	0,71	0,537	14,223	21,5	21,0
Mínimo	0,70	0,095	2,515	16,0	16,0

4.2 Caracterização das condições iniciais dos ensaios

Os parâmetros apresentados no quadro 4.3 caracterizam as condições iniciais do escoamento em cada ensaio, nomeadamente a aceleração da gravidade reduzida inicial (g'_0), o fluxo sedimentar inicial (B_0), o número de Richardson inicial (Ri_0), o número de Froude densimétrico inicial (Frd_0), o número de Reynolds inicial (Re_0) e os valores da densidade dos sedimentos (ρ_s) e da corrente (ρ_c).

Quadro 4.3 - Parâmetros característicos iniciais.

Ensaio	ρ_c (Kg/m ³)	g'_0 (cm/s ²)	B_0 (cm ³ /s ³)	Ri_0	Frd_0	Re_0
S1-1	1000,37	1,54	35,90	0,13	2,75	2141
S1-2	1001,30	3,24	75,65	0,28	1,89	2381
S1-3	1006,97	8,71	203,30	0,75	1,16	2355
S2-1	999,51	1,69	39,32	0,15	2,63	2418
S2-2	1001,09	3,04	71,91	0,25	1,99	2415
S2-3	1004,31	6,20	144,69	0,53	1,37	2381
S3-1	1000,46	1,64	38,18	0,14	2,67	2141
S3-2	1001,49	2,64	61,64	0,23	2,10	2141
S3-3	1005,34	6,33	147,61	0,54	1,36	2102
Máximo	1007,07	8,71	203,30	0,75	2,75	2418
Mínimo	999,51	1,54	35,90	0,13	1,16	2141

Os valores foram calculados tendo em conta a massa volúmica e o coeficiente de viscosidade da água (Anexo 1) à temperatura no tanque de mistura em cada ensaio.

Pode-se verificar que o escoamento à entrada do canal se encontra em regime rápido pois $Ri < 1$. O número de Reynolds inicial (Re_0) é superior a 1000 em todos os ensaios, garantindo a turbulência do escoamento.

No quadro 4.4 são apresentados os parâmetros característicos iniciais utilizados por outros autores nos seus estudos. Consta-se que a gama de concentrações iniciais de sedimentos em suspensão utilizada no presente estudo é muito semelhante à utilizada por Altinakar (1998). Quanto aos restantes parâmetros, podem-se considerar dentro da gama utilizada por Alves (2008) e Rossato (2010). No entanto, a gama dos parâmetros no presente estudo é mais reduzida e os valores mínimos para C_{s0} e B_0 utilizados neste estudo são inferiores aos utilizados por todos os referidos autores.

Quadro 4.4 - Parâmetros característicos iniciais de diversos autores.

Autor	C_{s0} (%)		B_0 (cm ³ /s ³)		Ri_0	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Parker et al. (1987)	0,15	1	838	6003	0,04	0,38
Altinakar (1988)	0,11	0,47	46	418	0,01	0,47
Garcia (1989)	0,13	0,86	52	390	0,06	0,61
Oehy (2003)	2,07	4,55	84	310	0,22	1,23
Alves (2008)	0,11	1,25	41	1158	0,02	0,84
Rossato (2010)	0,23	0,8	88	301	0,32	1,1

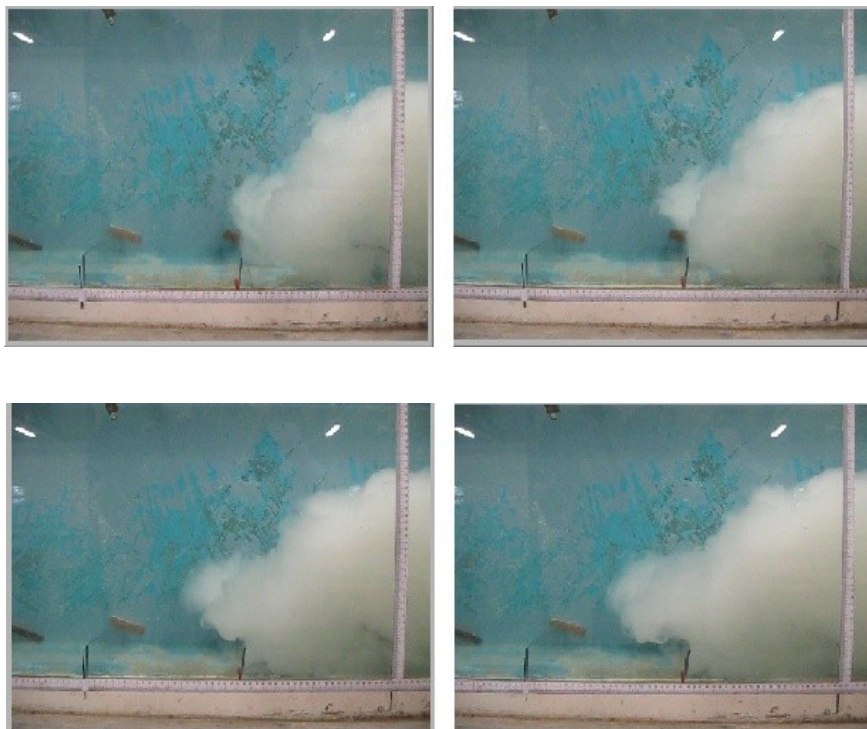
4.3 Frente da corrente

4.3.1 Descrição geral

Observou-se experimentalmente, a presença de lóbulos e fendas (Figura 4.2 a)) na frente da corrente. Estas estruturas avançavam continuamente e de forma irregular interagindo entre si. Os vórtices foram mais difíceis de identificar, excepto na zona em que a frente da corrente transpunha o obstáculo. Na zona do obstáculo era bem visível, em particular na parte inferior da corrente, a formação de vórtices. A figura 4.2 b) mostra a evolução no tempo da interacção entre a frente da corrente e os obstáculos.

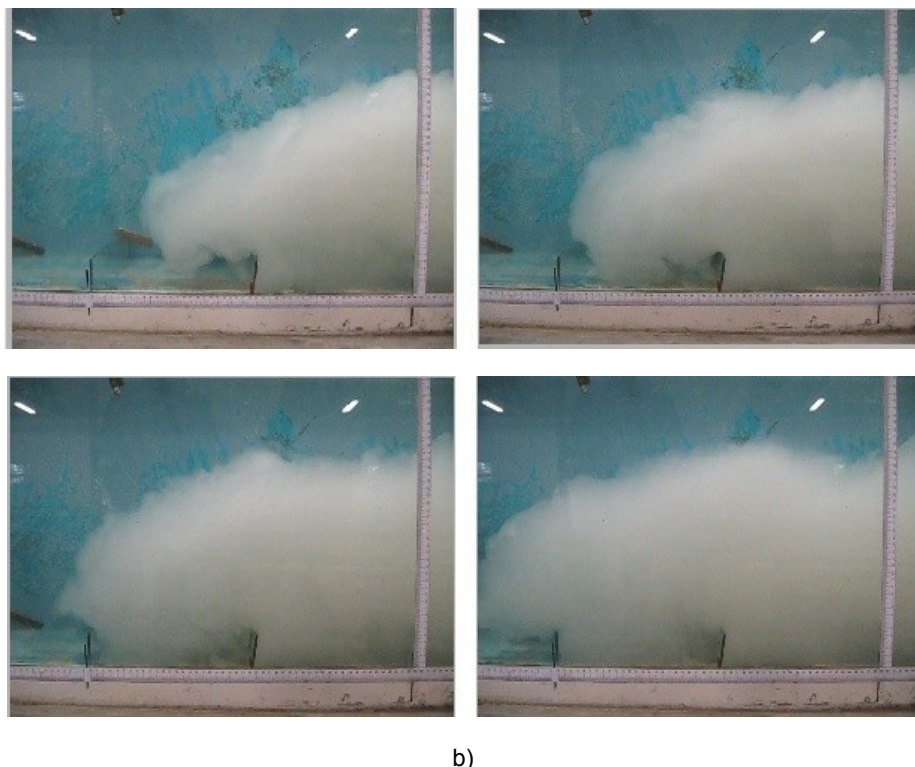


a)



b)

Figura 4.2 – Configuração da frente da corrente no ensaio S3-3: a) Vista de topo; b) imagens em sequência da interacção da frente da corrente com os obstáculos.



b)

Figura 4.2 (continuação) – Configuração da frente da corrente no ensaio S3-3: b) imagens em sequência da interação da frente da corrente com os obstáculos.

À medida que a frente da corrente transpunha os obstáculos observava-se ainda uma diminuição da opacidade na zona mais dianteira da frente em relação às zonas mais recuadas, provocada pela perda significativa de sedimentos e por diluição da corrente no fluido ambiente nas zonas da interface. Na figura 4.2 b) observa-se que existe uma porção de fluido ambiente junto ao fundo, que após a passagem da frente, fica entre o obstáculo e a zona dianteira da corrente, misturando-se depois progressivamente com a frente da corrente. Observou-se que esta porção de fluido é tanto maior quanto mais elevada for a velocidade da frente da corrente ao atingir o obstáculo. Após a transposição do último obstáculo, a frente da corrente voltava gradualmente a restabelecer-se.

4.3.2 Velocidade da frente inicial

A velocidade da frente da corrente foi determinada com base nos valores da posição da frente ao longo do tempo. Na determinação dos valores da velocidade inicial da frente da corrente (U_{fBF}), antes de atingir os obstáculos, foi desprezado o primeiro valor da posição da frente e considerados apenas os três valores seguintes (ver figura 4.4), pois em alguns ensaios o primeiro valor da velocidade da frente apresentava um desvio considerável relativamente aos restantes, resultante da proximidade com a zona de imersão da corrente. No quadro 4.5 apresentam-se os valores obtidos para a velocidade da frente da corrente antes dos obstáculos (U_{fBF}), bem como o fluxo sedimentar inicial (B_0) e o parâmetro $U_{fBF}/B_0^{1/3}$.

Quadro 4.5 - Valores da velocidade da frente e fluxo sedimentar iniciais.

Ensaio	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
U_{fBF} (cm/s)	2,4	3,1	5,0	2,4	3,4	4,5	2,6	3,1	4,2
B (cm ³ /s ³)	35,90	75,65	203,30	39,32	71,91	144,69	38,18	61,64	147,61
$U_{fBF}/B_0^{1/3}$	0,74	0,74	0,85	0,69	0,82	0,87	0,77	0,79	0,79

Verifica-se que os valores obtidos para o parâmetro $U_{fBF}/B_0^{1/3}$ neste estudo situaram-se entre 0,69 e 0,87, apresentando um valor médio de 0,79. Rossato (2010) obteve um valor médio de 0,91 e Alves (2008) o valor de 0,88. O valor médio obtido neste estudo é um pouco inferior. No entanto obtiveram-se valores próximos destes autores nos ensaios com concentrações iniciais de sedimentos em suspensão C_{s0} mais elevadas. Importa referir que os autores nos seus estudos utilizaram um número superior de ensaios com concentrações iniciais de sedimentos em suspensão mais elevadas do que as deste estudo, o que pode explicar esta diferença.

Na figura 4.3 pode observar-se a velocidade inicial da frente em função do fluxo sedimentar inicial. Confirma-se que os valores da velocidade inicial da frente da corrente obtidos neste estudo estão em concordância com os obtidos pelos outros autores, e foi encontrada a relação $U_{fBF} = 1,72 \ln(B_0) - 3,81$.

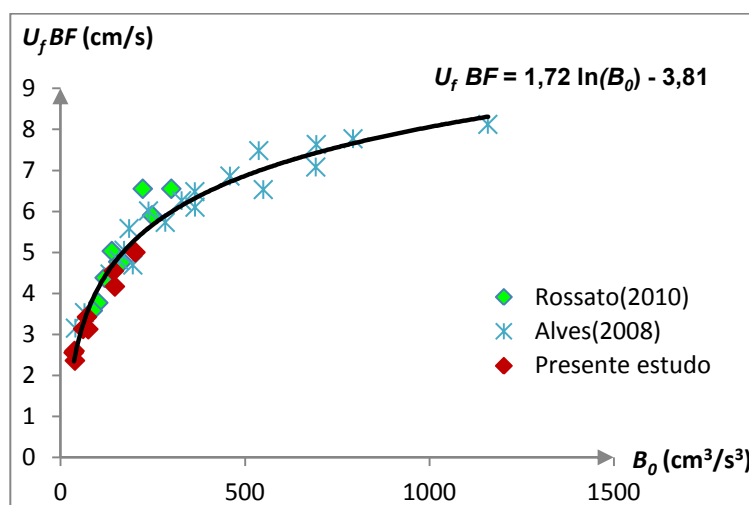


Figura 4.3 – Velocidade da frente da corrente em função do fluxo sedimentar inicial

4.3.3 Evolução da frente da corrente

De acordo com Alves (2008), nos ensaios conduzidos sem obstáculos e fundo fixo, a frente da corrente de turbidez desloca-se com velocidade aproximadamente constante, pelo que os pontos que representam a posição da frente em função do tempo podem ser aproximados a uma recta de declive constante.

Na figura 4.4 apresenta-se a velocidade da frente da corrente de turbidez (U_f) ao longo da posição (x) relativa à entrada do canal para as três séries de ensaios. É indicado também a posição do trecho de obstáculos em relação à entrada do canal. Pode verificar-se que o comportamento da velocidade da frente é muito semelhante em todos os ensaios de cada série, mesmo entre séries diferentes. Para uma melhor percepção do comportamento e tendência de evolução da velocidade da frente recorreu-se ao gráfico da figura 4.5, que indica a posição em relação à entrada do canal (x) da frente da corrente ao longo do tempo (t).

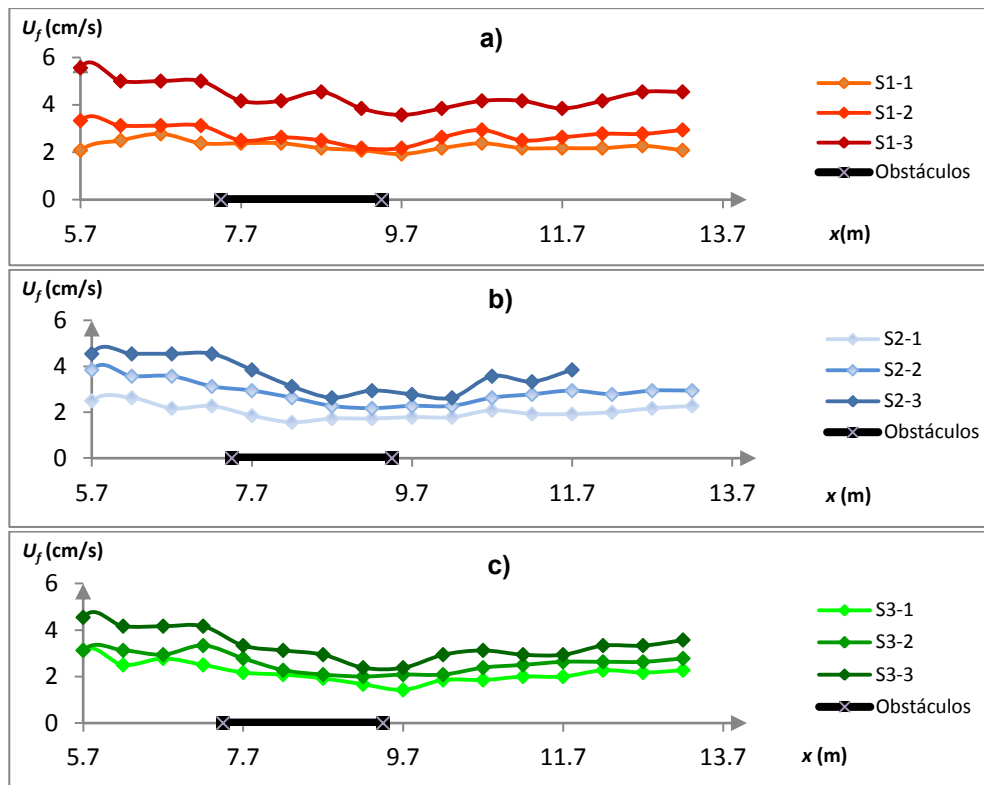


Figura 4.4 - Velocidade da frente da corrente: a) Série1; b) Série2; Série3

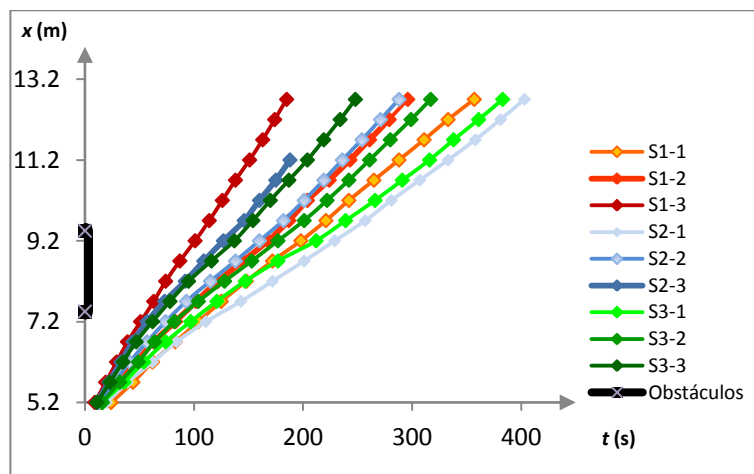


Figura 4.5 – Posição da frente da corrente ao longo do tempo.

No presente estudo, e em cada ensaio podem identificar-se três diferentes declives na recta. O primeiro, de maior valor corresponde à velocidade inicial da frente da corrente, o segundo, de menor valor, à velocidade da frente durante o trecho de obstáculos, e o último corresponde à velocidade da frente após os obstáculos. Devido à existência de alguma variabilidade da velocidade da frente, em especial perto da zona de imersão e após os obstáculos, o gráfico da figura 4.4 torna-se importante para determinar a velocidade após os obstáculos uma vez que permite visualizar qual o intervalo de tempo que melhor define o declive do troço final da recta. Este gráfico mostra ainda que a tendência de evolução da velocidade da frente é semelhante em todos os ensaios. A frente da corrente desloca-se com velocidade inicial aproximadamente constante até chegar aos obstáculos, altura a partir da qual sofre uma redução gradual da sua velocidade. Após a passagem de todos os obstáculos, segue-se um aumento da velocidade da

frente até um valor, inferior ao inicial, e que se mantém aproximadamente constante até ao final das medições.

No quadro 4.6 são apresentados os valores da velocidade da frente da corrente antes ($U_{f\ BF}$), durante ($U_{f\ OB}$) e após ($U_{f\ AF}$) o trecho de obstáculos, bem como a percentagem de redução da velocidade da frente da corrente devido aos obstáculos, calculada com base nos valores de $U_{f\ BF}$ e $U_{f\ AF}$. A velocidade da frente da corrente após os obstáculos foi calculada a partir do declive do troço final das rectas (Figura 4.5), escolhendo-se para isso os pontos de extremidade que melhor definiam esse troço.

Quadro 4.6 - Velocidade da frente da corrente.

Ensaio	$U_{f\ BF}$ (cm/s)	$U_{f\ OB}$ (cm/s)	$U_{f\ AF}$ (cm/s)	Redução (%)
S1-1	2,4	2,1	2,2	10,7
S1-2	3,1	2,4	2,8	11,1
S1-3	5,0	4,0	4,3	14,9
S2-1	2,4	1,7	2,1	11,7
S2-2	3,4	2,3	2,9	15,3
S2-3	4,5	2,9	3,6	21,4
S3-1	2,6	1,8	2,2	13,6
S3-2	3,1	2,1	2,7	14,5
S3-3	4,2	2,7	3,4	18,2

Com base nos valores das percentagens de decréscimo da velocidade da frente conclui-se que quanto maior a velocidade da frente inicial, maior o decréscimo devido à presença obstáculos.

A série S1 (de três obstáculos) foi a que revelou menores percentagens de redução da velocidade da frente da corrente. No entanto, entre a série S2 (de cinco obstáculos) e a S3 (de nove obstáculos) não é claro qual delas conduz a uma maior redução da velocidade da frente da corrente. Pode observar-se que na série S3 se obteve uma maior percentagem de redução no ensaio S3-1 (de concentração C_{s0} mais baixa) do que nos ensaios com C_{s0} semelhantes das restantes séries. No entanto, foi superada pela série S2 nos ensaios com C_{s0} maiores, sugerindo que existe não apenas a influência do número de obstáculos, mas também do espaçamento entre obstáculos. Em alguns ensaios da série S3, nomeadamente nos de maior C_{s0} , observou-se que a frente da corrente após transpor um obstáculo, ao voltar a descer incidia em cima do obstáculo seguinte, tornando esse obstáculo menos eficaz no bloqueio parcial da frente da corrente. Este fenómeno apenas se verificava nos primeiros obstáculos (onde a velocidade da frente era maior) confirmando existir uma relação entre a velocidade da frente da corrente e o espaçamento entre obstáculos, e explicando assim os resultados obtidos para as séries S2 e S3.

4.4 Características médias do escoamento

4.4.1 Velocidade e altura médias e velocidade máxima

A velocidade média e altura média apresentadas nos quadro 4.7 e 4.8 foram calculadas a partir das equações 2.11 e 2.12. Os perfis de velocidade obtidos pelo sistema UVP permitiram uma boa definição dos valores da velocidade da corrente de retorno e do fluido ambiente, pelo

que no cálculo destes integrais, nomeadamente na definição do limite superior de integração optou-se por incluir a corrente de retorno e o fluido ambiente.

Nos quadros 4.7 e 4.8 são apresentados os valores das velocidades e alturas médias obtidos em cada ensaio para todos os transdutores.

Quadro 4.7 - Velocidade média da corrente.

Ensaio	U (mm/s)					
	Transdutor					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	28,7	23,2	28,2	27,5	21,8	18,4
S1-2	34,2	39,4			22,1	23,7
S1-3	72,3	57,2			55,4	41,8
S2-1	26,3	22,8			20,2	25,0
S2-2	38,3	34,2			29,0	28,2
S2-3	60,6	48,3			46,8	41,3
S3-1	34,1	21,7	18,8	17,7	16,8	18,6
S3-2						
S3-3	58,0	45,7	28,5	36,9	37,8	53,4

Quadro 4.8 - Altura média da corrente.

Ensaio	h (mm)					
	Transdutor					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	130,8	157,9	164,8	168,8	158,7	183,4
S1-2	127,3	130,5			149,9	136,8
S1-3	83,4	92,6			123,0	119,9
S2-1	122,8	140,1			126,6	80,4
S2-2	113,5	128,9			135,6	126,5
S2-3	91,4	105,5			128,9	123,2
S3-1	144,8	150,3	123,5	160,9	141,4	180,0
S3-2						
S3-3	87,5	109,2	138,7	157,0	125,1	137,2

Obtiveram-se valores da velocidade média da corrente entre 17,7 mm/s e 72,3 mm/s, e alturas médias compreendidas entre 83,4 mm e os 180 mm. Tal como o esperado, para cada série, observa-se que nos ensaios de maiores concentrações iniciais de sedimentos em suspensão se obteve maiores velocidades e menores alturas médias em todos os transdutores, comparativamente a ensaios de concentrações iniciais de sedimentos em suspensão menores.

Verifica-se que existe uma redução da velocidade média U dos transdutores T1 e T2 situados a montante dos obstáculos para os transdutores T5 e T6 situados a jusante dos obstáculos. No entanto no ensaio S2-1 isso não se verifica. A velocidade e altura média deste ensaio nos transdutores a montante dos obstáculos (T1 e T2) estão coerentes com as obtidas nos restantes ensaios, mas no que diz respeito aos transdutores a jusante dos obstáculos (T5 e T6), as alturas médias são muito inferiores às esperadas (especialmente no T6) e a velocidade média no transdutor T6 é superior à do transdutor de jusante T2 (do mesmo ensaio). A explicação pode estar no facto de neste ensaio a concentração inicial de sedimentos em suspensão (C_{s0}) variar ao longo do ensaio, o que pode ter levado a uma corrente mais rápida com o decorrer do ensaio.

Como a velocidade e altura média nos transdutores T1 e T2 são calculadas tendo em conta um intervalo de tempo inicial do ensaio (onde C_{s0} era mais pequeno), enquanto nos transdutores T5 e T6 são calculadas num intervalo de tempo posterior, então é possível que as grandezas deste ensaio, devido aos diferentes períodos de tempo utilizados no seu cálculo, associado à maior variação da C_{s0} , não se apresentem tão coerentes com as dos outros ensaios.

Ao analisar-se nos ensaios S3-1 e S3-3, os transdutores T3 e T4 situados dentro do trecho de obstáculos constata-se uma diminuição da velocidade média comparativamente a todos os restantes transdutores. Já o mesmo não acontece no ensaio S1-1, onde se obtiveram valores de velocidade mais elevados do que nos restantes transdutores (com excepção do transdutor T1, situado a montante dos obstáculos). Isto deve-se a que nos ensaios da série S3 os transdutores T3 e T4 efectuaram medições na zona dos obstáculos (incidindo nos obstáculos), enquanto no ensaio S1-1 estes efectuaram medições na zona entre os obstáculos (o que pode ser confirmado com a observação dos perfis de velocidade dos respectivos transdutores). Nos transdutores T3 e T4 do ensaio S1-1 as velocidades obtidas são maiores pois, após a corrente transpor o obstáculo, pela acção da gravidade a corrente é projectada para o fundo do canal (originando a formação de vórtices maiores na parte inferior da corrente na zona da descida até ao fundo) e provoca um novo aumento da velocidade.

Por se encontrar mais afastado da zona de imersão, e portanto estando sujeito a menor instabilidade, optou-se por considerar apenas o transdutor T2 para caracterizar o escoamento a montante dos obstáculos. Devido a alguns perfis de velocidade do transdutor T6 apresentarem bastante ruído, considerou-se apenas o T5 para caracterizar o escoamento a jusante dos obstáculos.

Uma relação aproximadamente linear entre a velocidade nos transdutores T2 e T5, representativos das condições respectivamente a montante e a jusante dos obstáculos, pode ser observada na figura 4.6.

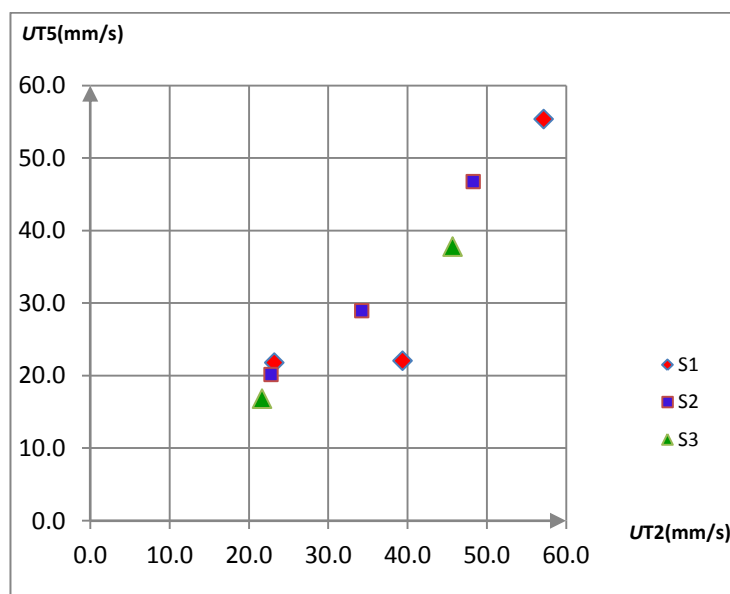


Figura 4.6 – Relação entre velocidade média a montante (T2) e a jusante (T5) dos obstáculos.

A velocidade média a jusante dos obstáculos aumenta linearmente com o aumento da velocidade média a montante. A influência do número de obstáculos (e espaçamento entre obstáculos) é pouco nítida na relação entre velocidades, uma vez que as linhas de tendência (rectas) que se podem traçar para cada série apresentam declives muito semelhantes. O ponto mais disperso corresponde ao ensaio S1-2. Neste ensaio foi obtido um valor da velocidade média inferior ao esperado, a jusante dos obstáculos. Em alguns ensaios obtiveram-se a jusante dos obstáculos, velocidades de cerca de 5 mm/s e 14 mm/s superiores às de montante. Eventualmente, o ponto correspondente ao ensaio S1-2 pode estar mais disperso, devido ao

transdutor T5 ter sido influenciado pelo sistema de recolha de amostras de concentração, que não estaria colocado a uma distância suficiente nesse ensaio.

Na figura 4.7 pode-se observar a redução da altura da corrente após o último obstáculo e de seguida o seu incremento para jusante. É visível ainda uma ligeira diminuição da opacidade da corrente após o último obstáculo nomeadamente na região superior, devendo-se à mistura com o fluido ambiente na zona da interface e pela maior deposição de sedimentos durante o trecho com obstáculos.

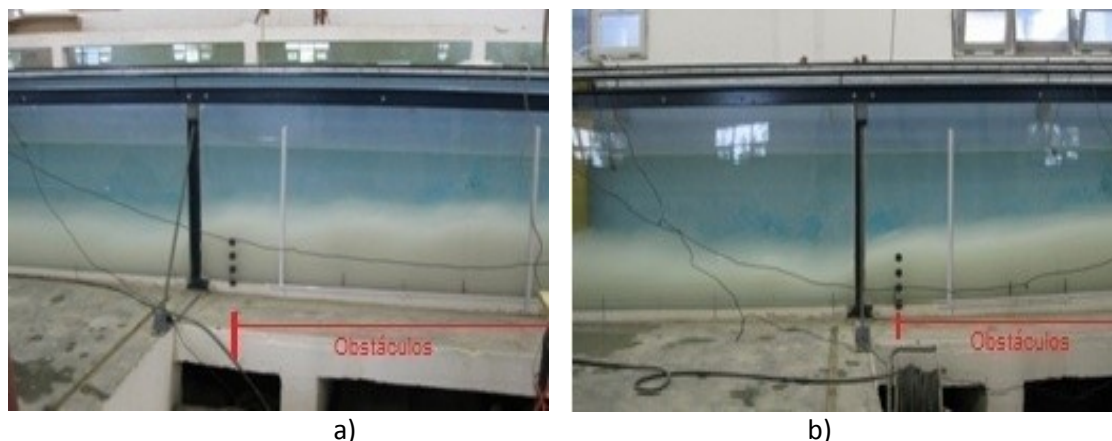


Figura 4.7 – Aspecto da altura da corrente durante e após os obstáculos nos ensaios: a) S2-3; b) S3-3.

Nos quadros 4.9 e 4.10 são apresentados os valores da velocidade máxima (U_{max}) e da sua respectiva altura em relação ao fundo do canal onde ocorre (h_m). Estes valores foram extraídos directamente dos perfis de velocidade médios em cada transdutor.

Quadro 4.9 - Velocidade máxima da corrente.

Ensaio	U_{max} (mm/s)					
	Transdutor					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	39,4	32,0	34,1	36,8	29,6	24,8
S1-2	41,7	47,4			29,9	31,3
S1-3	82,2	59,9			64,7	50,3
S2-1	33,6	28,3			24,6	22,3
S2-2	53,1	42,1			37,4	33,5
S2-3	69,6	58,1			55,4	49,5
S3-1	44,2	29,0	20,6	22,2	23,3	26,7
S3-2						
S3-3	68,3	54,1	32,5	46,8	47,0	68,3

Quadro 4.10 - Altura do ponto de velocidade máxima.

Ensaio	h_m (mm)					
	Transdutor					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	25,0	45,9	121,0	111,3	96,0	34,8
S1-2	23,6	45,9			40,3	58,4
S1-3	27,8	29,2			41,7	30,6
S2-1	58,4	48,7			32,0	69,5
S2-2	29,2	37,6			44,5	70,9
S2-3	27,8	25,0			69,5	40,3
S3-1	38,9	41,7	123,8	109,9	34,8	90,4
S3-2						
S3-3	33,4	30,6	122,4	140,5	34,8	54,2

O gráfico da figura 4.8 mostra que a relação entre a velocidade máxima e velocidade média da corrente se mantém constante ao longo do canal, não existindo influência dos obstáculos. Salienta-se que os transdutores T3 e T4 que efectuavam medições na zona dos obstáculos e apresentavam perfis de velocidade diferentes dos restantes, também obtiveram a mesma relação U_{max}/U que os restantes.

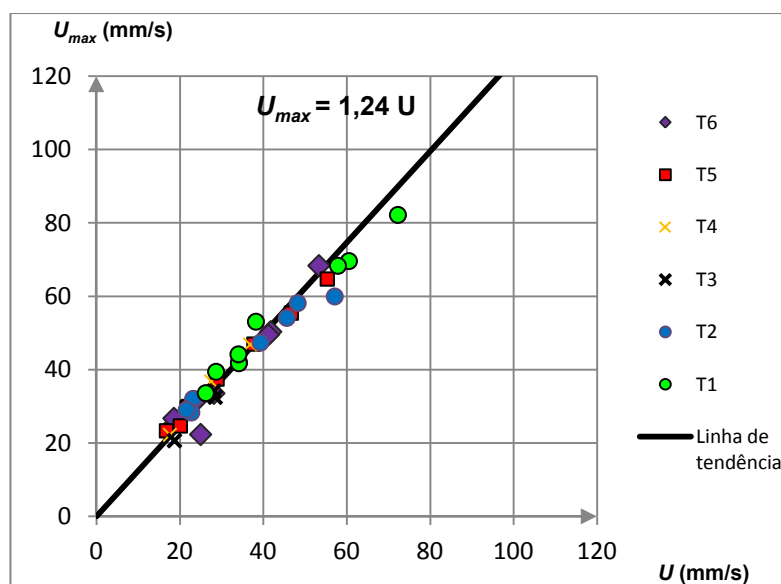


Figura 4.8 – Relação entre a velocidade máxima e a velocidade média.

O valor médio obtido por Rossato (2010) para esta relação foi 1,37 e de 1,31 por Alves (2008). Neste estudo, o valor médio obtido foi de 1,24, sendo inferior ao dos outros autores. Uma possível razão tem por base o método do cálculo valor de U . Os autores anteriormente referidos utilizaram para o cálculo da velocidade e da altura média da corrente as escalas integrais de Ellison e Turner, (1959) considerando o ponto onde a velocidade se anula (h_t) como limite superior dos integrais, não incluindo assim a corrente de retorno. Neste estudo optou-se por aumentar o limite superior do integral considerando a corrente de retorno, obtendo-se assim valores ligeiramente superiores para U . Como U_{max} foi determinado de igual modo em ambos os estudos, então a relação U_{max}/U é inferior.

No gráfico da figura 4.9 observa-se a relação entre a altura média da corrente e a altura do ponto de velocidade máxima obtida nos transdutores T2 e T5 (respectivamente a montante e jusante dos obstáculos).

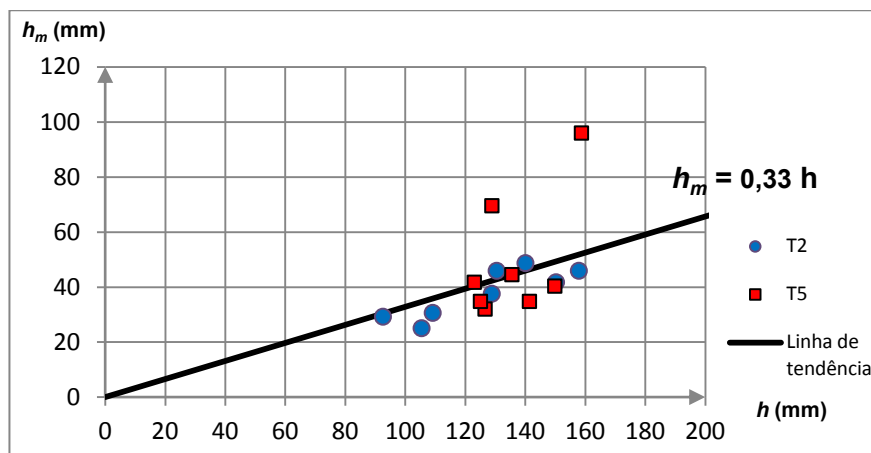


Figura 4.9 – Relação entre altura média e altura correspondente ao ponto de velocidade máxima.

No gráfico, os valores mais afastados da linha de tendência correspondem aos do transdutor T5 nos ensaios S1-1 e S2-3. Isto deve-se a que nestes ensaios, os perfis de velocidades deste transdutor (ver anexo 2), não apresentavam uma forma tão semelhante à dos perfis de velocidade típicos de uma corrente de turbidez, e portanto o ponto de velocidade máxima não se encontrava na mesma zona de um perfil típico. O valor médio obtido neste estudo para a relação h_m/h foi de 0,33, muito próximo do valor 0,31 obtido por Alves (2008) e de 0,32 obtido por Altınakar (1988).

Apresentam-se nos quadros 4.11 e 4.12, respectivamente, os valores da velocidade e altura média da corrente no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo consecutivos, iniciados em $t = 163$ s após o início das medições do sistema UVP (coincidente com o início do ensaio). Os intervalos de tempo Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 e Δt_4 correspondem a 84, 81, 84 e 79 segundos, respectivamente.

Quadro 4.11 - Velocidade média da corrente no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo consecutivos.

Δt	U (mm/s)								
	Ensaio								
	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
Δt_1	21,6	35,1	54,3	25,6	32,9	46,0	24,9		56,8
Δt_2	24,1	37,6	46,2	31,9	36,2	51,1	26,6		46,9
Δt_3	21,6	36,6	44,4	22,6	26,3	54,8	24,3		33,7
Δt_4	20,8	29,6	38,0	21,0	31,3	42,0	26,3		40,8

Quadro 4.12 - Altura média da corrente no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo consecutivos.

Δt	h (mm)								
	Ensaio								
	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
Δt_1	159,9	141,8	105,2	129,8	149,3	107,3	157,9		72,9
Δt_2	154,6	133,9	110,9	106,9	107,6	95,8	147,3		88,3
Δt_3	187,7	130,7	110,0	137,1	133,5	75,6	176,2		139,3
Δt_4	182,1	168,1	127,3	145,3	147,5	131,4	117,2		122,8

Como se pode constatar, verifica-se em alguns ensaios, uma variação dos valores de U e h ao longo do ensaio. Esta variação pode resultar da proximidade da zona de imersão, do ruído nas leituras dos transdutores, dos erros associados ao cálculo destas grandezas, da influência da presença dos obstáculos, e da deposição de sedimentos no interior do tanque de mistura.

Nas figuras 4.10 e 4.11 pode observar-se a evolução da velocidade e altura média da corrente em função do intervalo de tempo Δt onde foram calculadas.

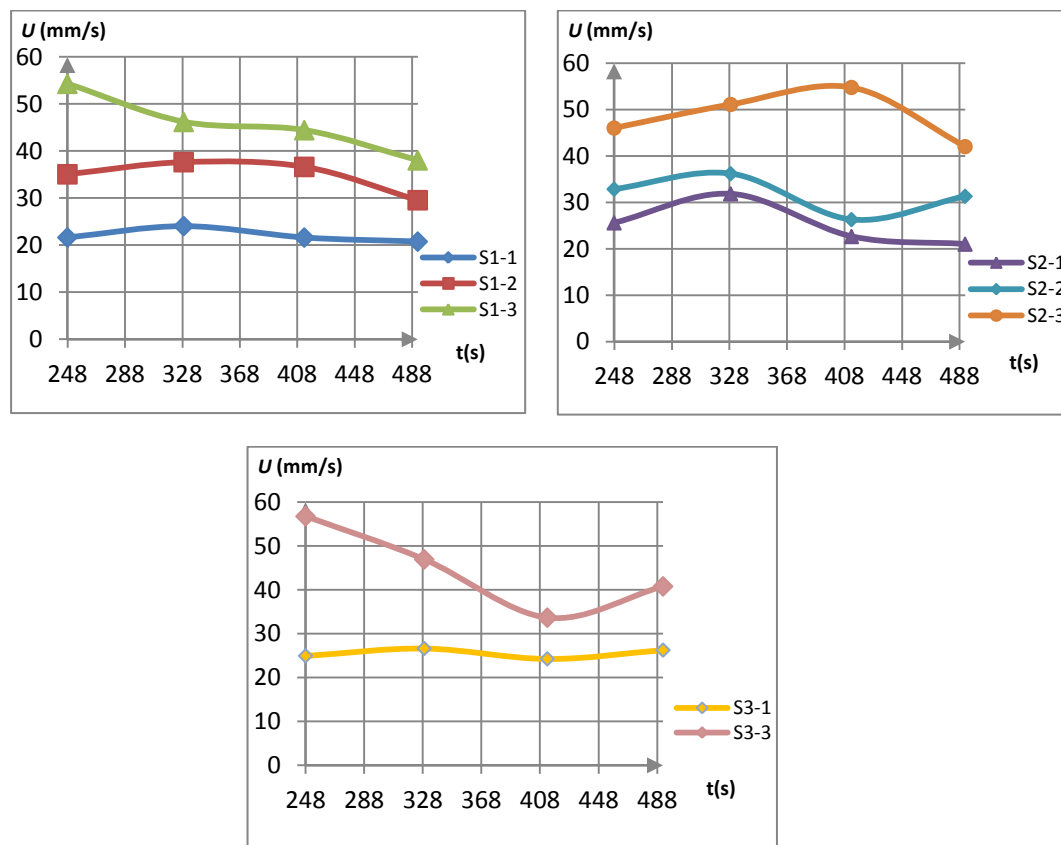


Figura 4.10 – Variação da velocidade média no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.

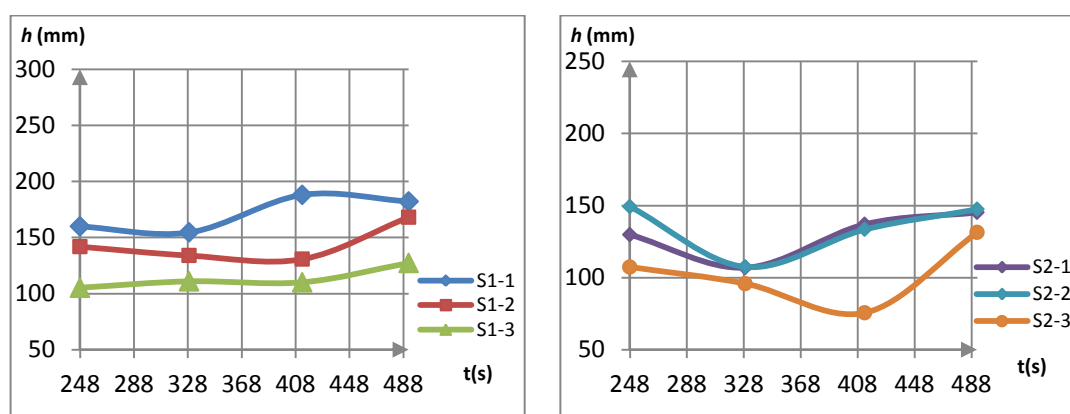


Figura 4.11 - Variação da altura média no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo

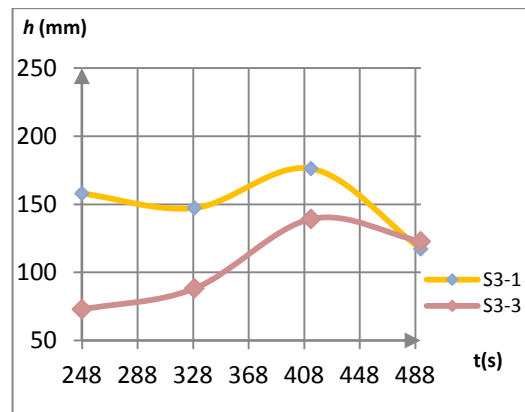


Figura 4.11 (continuação) - Variação da altura média no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.

Embora exista alguma variabilidade dos valores de U e h em alguns ensaios, verifica-se de modo geral que a forma dos gráficos é semelhante tanto para a velocidade média como para a altura média. Observa-se ainda uma tendência para a diminuição da velocidade média e o aumento da altura média, reflectindo a influência da presença dos obstáculos no escoamento a montante.

4.4.2 Interface entre a corrente e o fluido ambiente

A zona da interface da corrente de turbidez corresponde à zona de separação entre a corrente e o fluido ambiente, e é definida no perfil de velocidades pelo ponto na parte superior da corrente onde a velocidade se anula.

No quadro 4.13 apresentam-se os valores da altura do perfil de velocidade onde a velocidade se anula (h_t), e no quadro 4.14, os valores da relação entre esta e a altura média da corrente (h_t/h).

Quadro 4.13 - Altura do perfil de velocidades onde a velocidade se anula (h_t).

Ensaio	h_t (mm)					
	Transdutor					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	176,6	205,8	218,3	208,6	239,2	222,5
S1-2	180,8	216,9			215,6	189,1
S1-3	168,2	173,8			183,6	178,0
S2-1	178,0	180,8			207,2	172,4
S2-2	180,7	191,9			205,8	204,4
S2-3	169,6	172,4			203,0	172,4
S3-1	207,2	203,0	253,1	254,5	189,1	221,1
S3-2						
S3-3	155,7	178,0	240,6	240,6	182,2	189,1

Quadro 4.14 - Relação h_t/h .

Ensaio	h_t/h					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
S1-1	1,35	1,30	1,32	1,24	1,51	1,21
S1-2	1,42	1,66			1,44	1,38
S1-3	2,02	1,88			1,49	1,48
S2-1	1,45	1,29			1,64	2,15
S2-2	1,59	1,49			1,52	1,62
S2-3	1,86	1,64			1,58	1,40
S3-1	1,43	1,35	2,05	1,58	1,34	1,23
S3-2						
S3-3	1,78	1,63	1,73	1,53	1,46	1,38

A figura 4.12 mostra a relação entre altura do perfil de velocidade onde a velocidade se anula e a altura média da corrente (h_t/h).

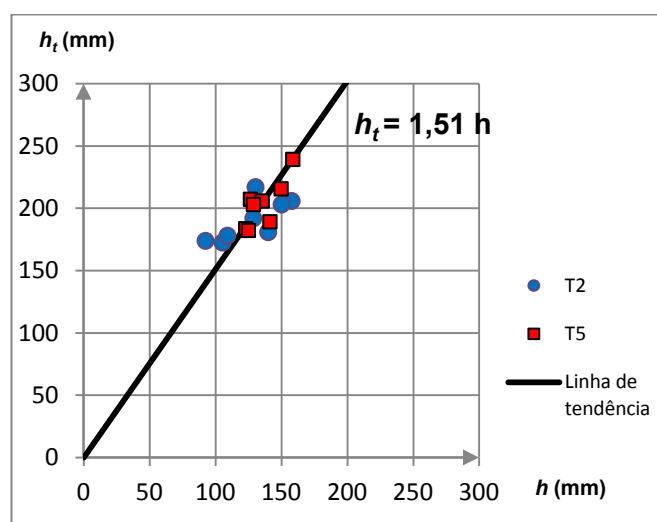


Figura 4.12 – Relação entre h e h_t .

Apesar de uma ligeira dispersão nos resultados, pode-se concluir que a relação h_t/h se mantém constante a montante e a jusante dos obstáculos, não sendo por isso influenciada nestas duas zonas do escoamento pela sua presença. Os pontos mais afastados da linha de tendência correspondem aos do transdutor T2, cujas grandezas são calculadas utilizando um intervalo de tempo mais pequeno do que os do transdutor T5, podendo por isso serem afectados de erros de medição maiores.

O valor médio obtido de h_t/h neste estudo é de 1,51. Rossato (2010) chegou a um valor de 1,32 e Alves (2008) a um valor de 1,29 para este coeficiente. O valor obtido neste estudo, é superior ao dos outros autores e pode ser explicado de forma idêntica ao da relação U_{max}/U . Neste caso os valores de h obtidos considerando a corrente de retorno são menores, aumentando assim valor do coeficiente h_t/h .

À semelhança da análise que se fez anteriormente para a velocidade e altura média da corrente, no quadro 4.15 é apresentada a variação de h_t e de h_t/h (Quadro 4.16) ao longo dos quatro intervalos de tempo Δt consecutivos.

Quadro 4.15 - Altura h_t no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo.

Δt	h_t (mm)								
	Ensaio								
	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
Δt_1	228,1	215,6	197,5	205,8	211,4	178,0	204,4		201,7
Δt_2	196,1	222,5	201,7	210,0	179,4	190,5	218,3		171,1
Δt_3	253,1	223,9	173,9	235,0	205,0	179,4	260,1		204,4
Δt_4	251,7	254,5	200,3	235,1	210,0	211,4	194,0		191,9

Quadro 4.16 - Relação h_t/h no transdutor T2 em 4 intervalos de tempo.

Δt	h_t/h								
	Ensaio								
	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
Δt_1	1,43	1,52	1,88	1,59	1,42	1,66	1,29		2,76
Δt_2	1,27	1,66	1,82	1,96	1,67	1,99	1,48		1,94
Δt_3	1,35	1,71	1,58	1,71	1,54	2,37	1,48		1,47
Δt_4	1,38	1,51	1,57	1,62	1,42	1,61	1,66		1,56

Na figura 4.13 pode observar-se a evolução no transdutor T2 de h_t em função do tempo final do intervalo onde esta grandeza foi calculada.

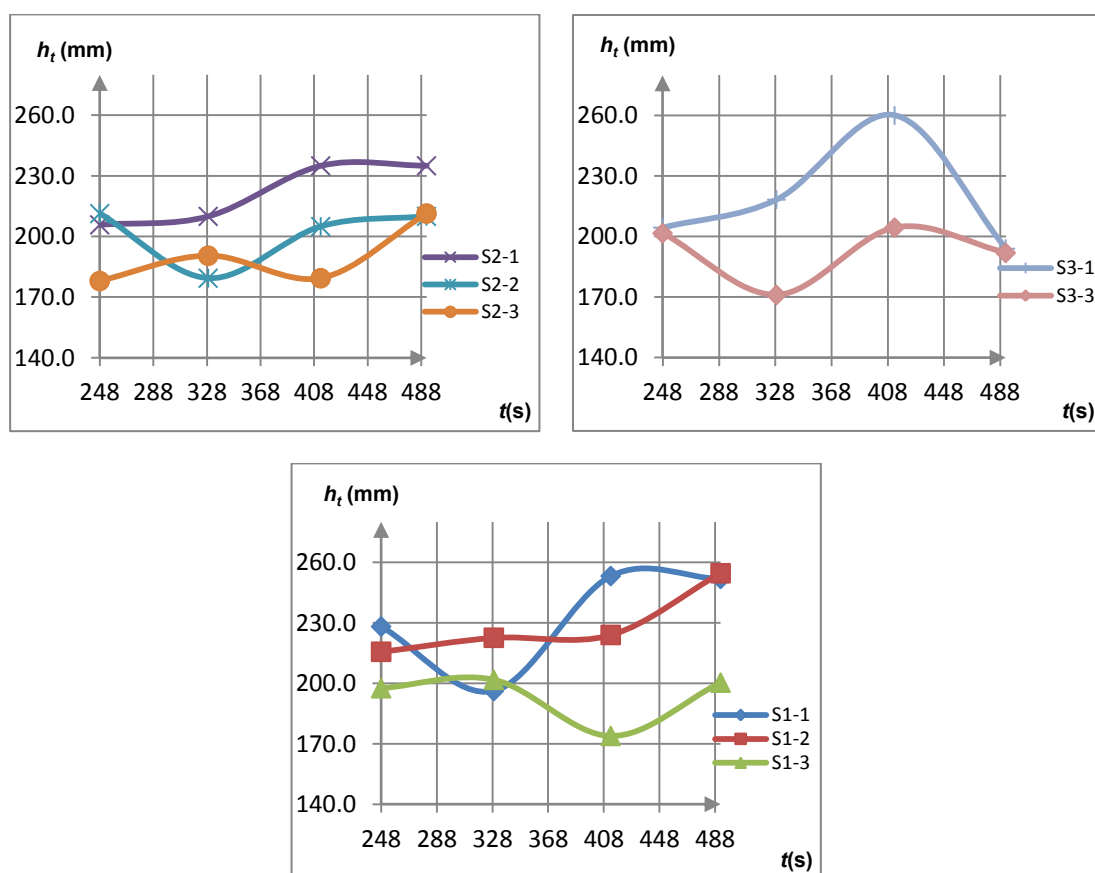


Figura 4.13 - Variação de h_t no transdutor T2 ao longo de 4 intervalos de tempo.

Apesar da variabilidade dos valores de h_t ao longo do tempo, observa-se uma tendência para o seu aumento, reflectindo a influência da presença dos obstáculos no escoamento a montante. É importante salientar que durante a análise destas grandezas (U , h , e h_t) ao longo do tempo, se verificou que os valores obtidos (quadros 4.11, 4.12, 4.15 e 4.16) podem apresentar em alguns casos, grande sensibilidade relativamente aos limites do intervalo de tempo utilizado para o seu cálculo, isto é, considerando um intervalo de tempo ligeiramente diferente, por vezes obtém-se valores significativamente diferentes para estas grandezas.

4.4.3 Perfis médios de velocidade

Na figura 4.14 são apresentados os perfis médios de velocidade nos transdutores T2 e T5, representativos do escoamento, respectivamente, a montante e jusante dos obstáculos.

Os perfis médios de velocidade de todos os transdutores utilizados nos ensaios são apresentados em anexo (Anexo 2).

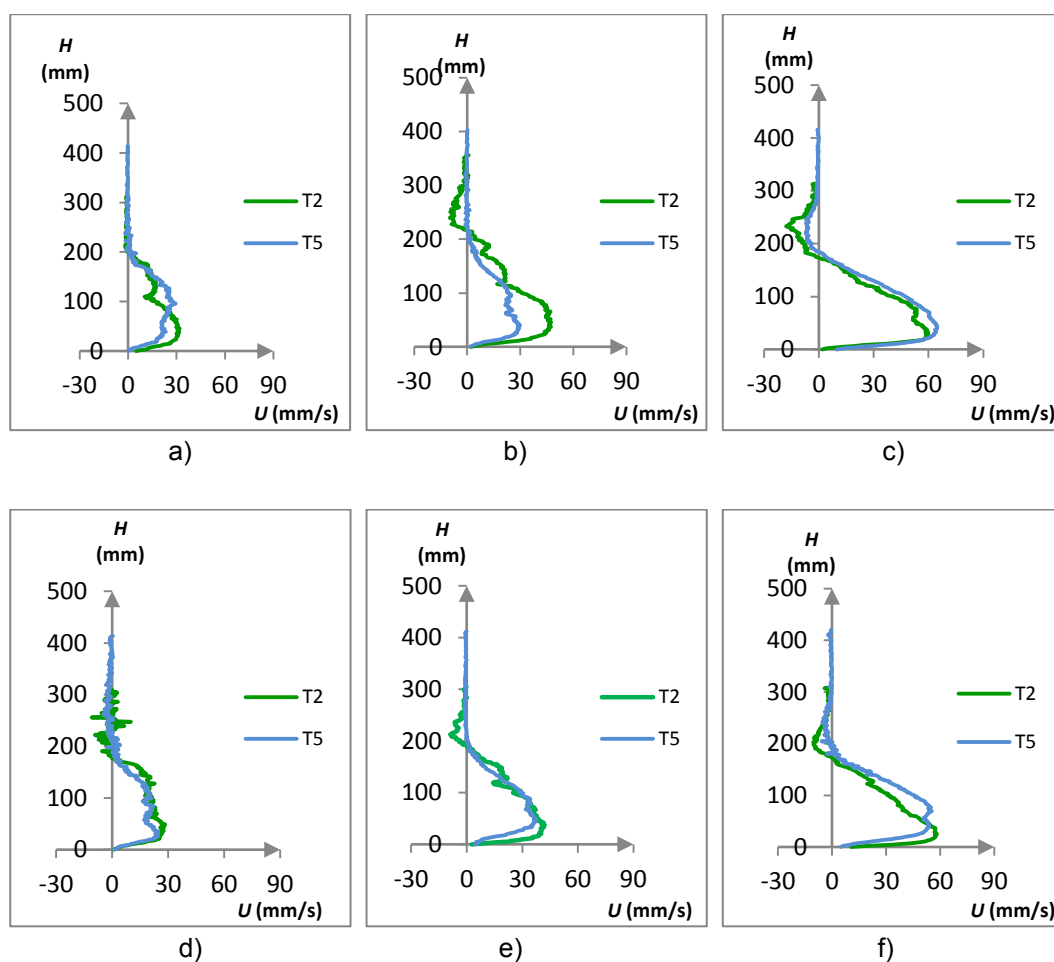


Figura 4.14 – Perfis de velocidade dos transdutores T2 e T5 nos ensaios: a) S1-1; b) S1-2; c) S1-3; d) S2-1; e) S2-2; e) S2-3; f) S2-3; g) S3-1; h) S3-3.

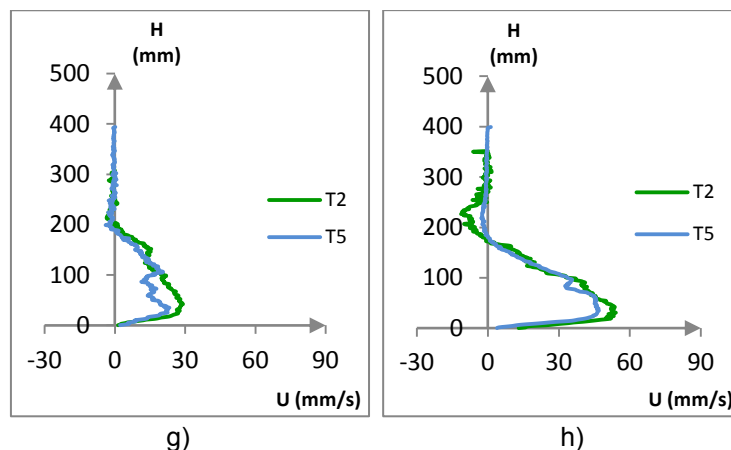


Figura 4.14 (continuação) – Perfis de velocidade dos transdutores T2 e T5 nos ensaios: g) S3-1; h) S3-3.

De um modo geral, a forma dos perfis de velocidade não se altera significativamente entre estas duas zonas do escoamento. A forma dos perfis de velocidade apresenta-se mais definida nos ensaios com velocidades médias maiores. Os perfis médios de velocidade de correntes com velocidades médias menores apresentam maiores irregularidades, e que estão possivelmente relacionadas com maiores instabilidades que estas correntes apresentam. Em Sousa (2011), foi observado que as correntes salinas com menores densidades reproduzem instabilidades de Kelvin Helmholtz mais expansivas verticalmente e que o seu ciclo se processa com mais evidência.

Importa ainda referir que são os perfis de velocidade do transdutor T5 a apresentarem na sua forma maiores irregularidades, podendo estas estarem relacionadas com a proximidade do transdutor aos obstáculos, reflectindo assim instabilidades que foram provocadas na corrente pela transposição dos obstáculos.

Na figura 4.15 estão representados os perfis de velocidade dos transdutores T3 e T4 no ensaio S3-3 (semelhantes aos do ensaio S3-1).

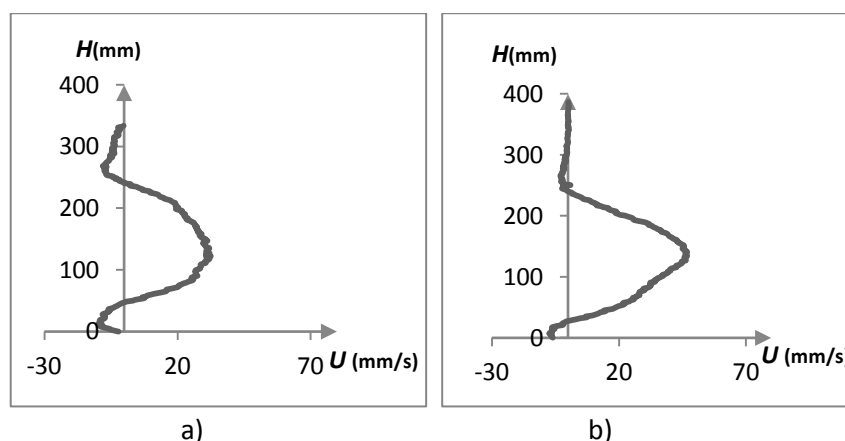


Figura 4.15 – Perfis de velocidade do ensaio S3-3 nos transdutores: a) T3; b) T4.

Estes perfis de velocidade apresentam uma configuração diferente dos observados anteriormente uma vez que estes transdutores efectuavam medições na zona dos obstáculos (zona incidente), apresentando por isso uma corrente de retorno também na parte inferior, resultante da transposição do obstáculo pela corrente. Por acção da gravidade a corrente é projectada para o fundo do canal após transpor o obstáculo, passando a ter durante esse instante uma nova zona de interface com a água (fluido ambiente), nomeadamente na zona inferior da corrente. Assim, a corrente provoca o deslocamento para montante, não só da

camada de água situada acima da interface superior, como também na camada de água abaixo da zona da interface inferior.

Nas figuras 4.16 e 4.17 podem-se observar os perfis médios de velocidade adimensionais para os transdutores T2 e T5, utilizando os parâmetros adimensionais z/h e u/U .

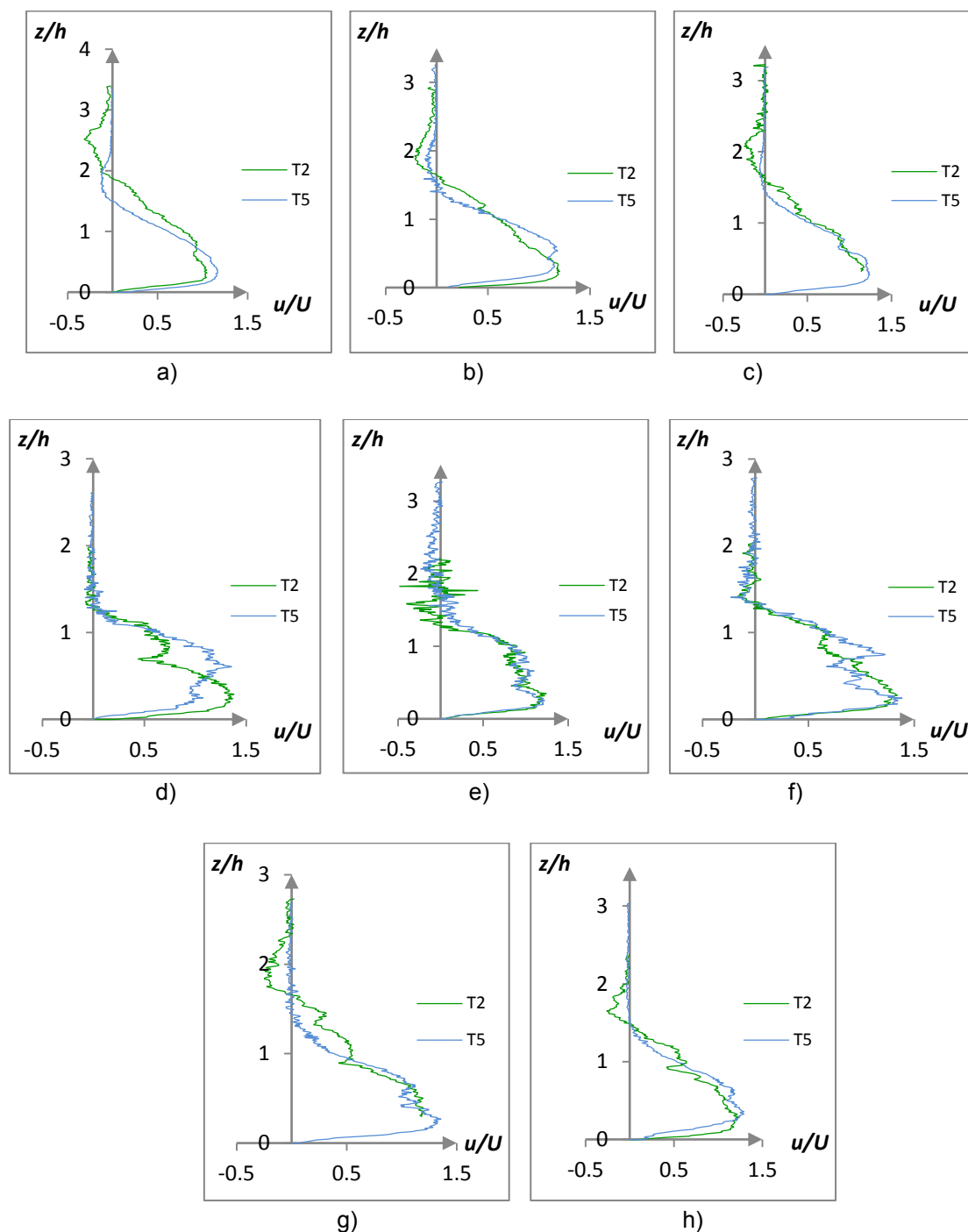


Figura 4.16 – Perfis de velocidade adimensionais nos transdutores T2 e T5 nos ensaios: a) S1-3; b) S2-3; c) S3-3; d) S1-1; e) S2-1; f) S3-1; g) S1-2; h) S2-2.

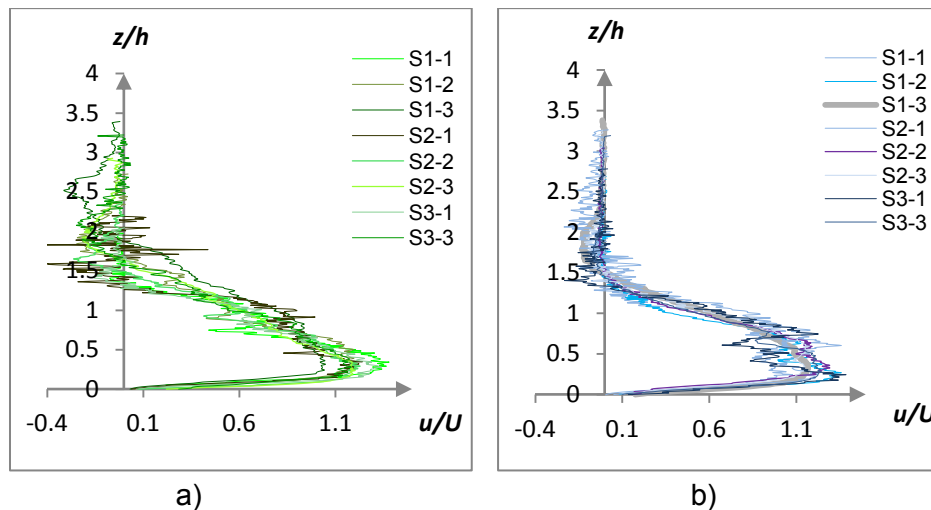


Figura 4.17 – Perfis de velocidade adimensionais de todos os ensaios nos transdutores: a) T2; b) T5.

Observa-se nos ensaios com velocidades mais elevadas (S1-3, S2-3 e S3-3), de T2 para T5 (de montante para jusante dos obstáculos), no ponto onde ocorre o máximo de u/U da corrente de retorno, uma redução de u/U para cerca de metade, e uma redução de z/h (Figura 4.16). No entanto, nos ensaios com velocidades menores (S1-1, S2-1 e S3-1), isso não acontece e as diferenças entre os perfis de velocidade adimensionais de montante e jusante não se apresentam muito significativas, encontrando-se apenas nas zonas mais irregulares dos perfis. Rossato (2010) utilizando apenas um obstáculo de 20 cm, e onde as medições da velocidade a montante e jusante foram efectuadas a distâncias ao obstáculo superiores às do presente estudo, observou que os perfis de velocidade adimensionais de montante e jusante eram coincidentes e portanto, os perfis de velocidade da corrente são independentes das condições iniciais, não se verificando a influência da presença do obstáculo. Desta forma, os resultados obtidos neste estudo podem dever-se à proximidade do transdutor de jusante ao último obstáculo, relacionado com a maior turbulência induzida pela presença dos obstáculos no escoamento, com mais preponderância nos ensaios com velocidades mais elevadas. Na figura 4.17 verifica-se ainda, que em cada transdutor, a forma dos perfis de velocidade adimensionais é semelhante em todos os ensaios, concluindo-se que não existe uma influência significativa do número de obstáculos neste aspecto da corrente.

4.4.4 Perfis de concentração de sedimentos em suspensão

Nas figuras 4.18 e 4.19 estão representados os perfis de concentração de sedimentos em suspensão na corrente de turbidez a montante e a jusante dos obstáculos, respectivamente, obtidos com base na análise das amostras recolhidas em cada um dos ensaios.

A montante, a forma dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão é semelhante em todos os ensaios, particularmente entre ensaios de concentrações iniciais da mesma ordem de grandeza. A forma destes perfis é também semelhante aos obtidos por Alves (2008) e Rossato (2010).

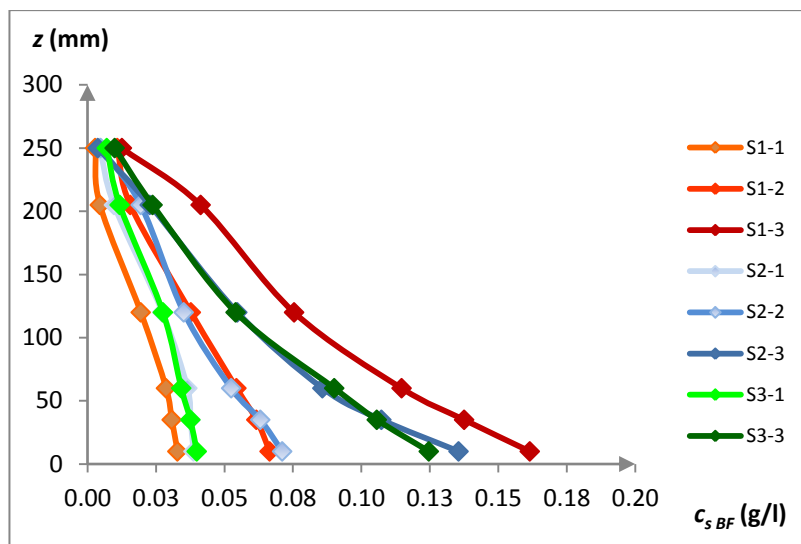


Figura 4.18 - Perfil de concentração de sedimentos em suspensão a montante dos obstáculos.

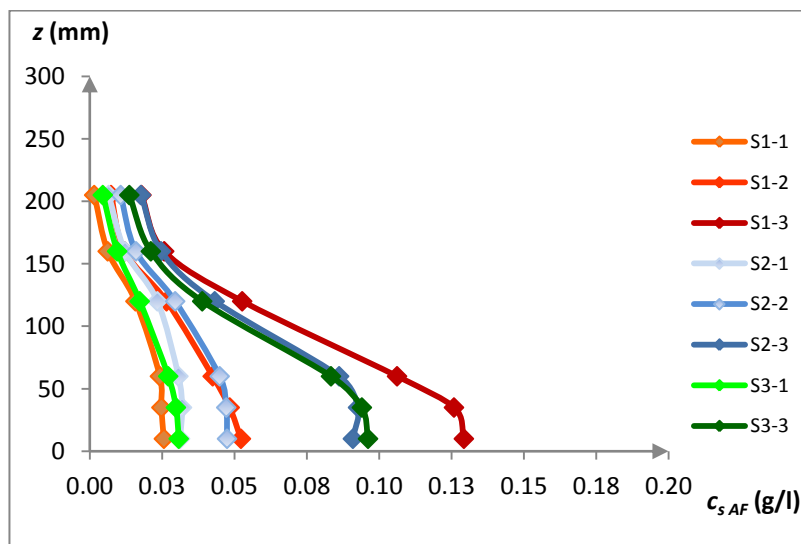


Figura 4.19 – Perfil de concentração de sedimentos a jusante dos obstáculos.

Importa referir que a jusante, a forma dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão não se altera de série para série, concluindo-se portanto que o número de obstáculos não tem influência significativa neste aspecto. No entanto, nos perfis de jusante, observa-se ainda que os dois valores de concentração de sedimentos mais perto do fundo do canal são muito semelhantes entre si, o que origina a alteração da forma destes perfis relativamente à forma dos perfis de montante. Este facto pode dever-se à proximidade do sistema de recolha de amostras de concentração ao último obstáculo, ou à maior turbulência induzida pela presença dos obstáculos no escoamento, originando uma região do perfil com concentração de sedimentos mais elevada.

O quadro 4.17 mostra os valores obtidos para a concentração inicial média de sedimentos em suspensão (C_{s0}), a concentração média de sedimentos em suspensão na corrente a montante dos obstáculos ($C_{s BF}$) e a jusante dos obstáculos ($C_{s AF}$), bem como a percentagem de redução de C_s calculada com base nos valores de $C_{s BF}$ e $C_{s AF}$.

Quadro 4.17 - Valores da concentração média de sedimentos antes e após os obstáculos.

Ensaio	C_{s0} (%)	C_{sBF} (%)	C_{sAF} (%)	Redução (%)
S1-1	0,095	0,025	0,015	40,2
S1-2	0,200	0,051	0,034	33,6
S1-3	0,537	0,125	0,096	23,0
S2-1	0,104	0,031	0,028	10,5
S2-2	0,187	0,046	0,038	17,0
S2-3	0,382	0,094	0,072	24,1
S3-1	0,101	0,037	0,023	36,4
S3-3	0,390	0,088	0,074	15,7

Verifica-se ao longo do canal, uma redução da concentração média de sedimentos. A primeira redução ocorre devido à mistura da corrente com a água na zona de imersão e é traduzida pela diferença entre C_{s0} e C_{sBF} . A redução seguinte ocorre entre a zona de montante e jusante dos obstáculos (traduzida pela diferença entre C_{sBF} e C_{sAF}) e é devida à mistura na zona da interface da corrente com a água, à deposição de sedimentos ao longo do canal e ao efeito da presença dos obstáculos. A presença dos obstáculos pode ter influência não só na deposição de sedimentos, como também no aumento da mistura que ocorre entre a corrente e o fluido ambiente na zona do trecho de obstáculos. Importa referir no entanto que a redução mais significativa da concentração média de sedimentos em suspensão é a que ocorre na zona de imersão.

O valor médio da C_s obtido neste estudo é de aproximadamente 25%, estando em concordância com o de outros autores. Este valor é menor do que o valor de 40% obtido por Rossato (2010) com um obstáculo de dimensões superiores aos deste trabalho, e maior do que o valor de 15% obtido por Alves (2008) que caracterizava a deposição de sedimentos numa corrente de turbidez ao longo de um canal sem obstáculos.

No entanto, para verificar a influência do número de obstáculos na redução da concentração média de sedimentos em suspensão é necessário algum cuidado a analisar os resultados deste estudo. Para além dos erros de medição associados à determinação das concentrações das amostras recolhidas nos ensaios, existem outros factores que podem condicionar os resultados obtidos como por exemplo a variação do diâmetro mediano dos sedimentos entre cada ensaio. Esta variação pode levar a uma maior deposição de sedimentos no fundo do canal em ensaios onde a percentagem de sedimentos de maior dimensão é mais elevada. Além disso, em alguns ensaios, a concentração inicial de sedimentos em suspensão (C_{s0}) apresentava alguma variação ao longo do ensaio o que se supõe resultar da deposição de sedimentos no tanque de mistura. Porém, o cálculo de C_s poderá ser o principal factor de erro a ter em conta uma vez que para além dos erros associados à determinação da concentração de sedimentos em suspensão, ainda estão incluídos os erros relativos ao cálculo das velocidades.

Note-se que o valor médio da concentração de sedimentos em suspensão (C_s) foi calculado a partir da equação 2.13. No seu cálculo apenas foram utilizados 6 valores pontuais da concentração (c_s) correspondentes à altura das tomadas de água do sistema de recolha de amostras da corrente e os seus respectivos valores da velocidade (u) retirados do perfil de velocidade. Tratando-se do cálculo de um integral, se o perfil de velocidades for muito irregular isso será reflectido no cálculo de C_s , uma vez que podemos estar a admitir um valor da velocidade (u) que não é o mais representativo para a respectiva c_s . Ao analisar os perfis de velocidade nos transdutores a montante e a jusante dos obstáculos, respectivamente T2 e T5, constata-se que, quando os perfis de T2 e T5 são semelhantes, as reduções de C_s são menores e quanto mais diferente a forma dos perfis maior é a redução de C_s .

No quadro 4.18 é apresentado os valores da percentagem de redução da concentração de sedimentos em suspensão local (c_s) a 10, 35, 60 e 120 mm do fundo. Estas percentagens de

redução foram calculadas tendo em conta os valores de c_s a montante e a jusante dos obstáculos, respectivos às alturas $z = 10$ mm, $z = 35$ mm, $z = 60$ mm e $z = 120$ mm.

Quadro 4.18 - Redução da concentração junto ao fundo.

z (mm)	Redução da concentração (%)								
	S1-1	S1-2	S1-3	S2-1	S2-2	S2-3	S3-1	S3-2	S3-3
10	22,0	21,4	20,0	19,3	33,3	32,9	22,9		22,8
35	19,5	21,5	8,5	15,2	25,2	13,6	20,8		11,0
60	15,4	21,9	7,4	16,0	14,4	0,4	20,8		7,5
120	18,8	29,7	30,2	14,4	16,0	21,1	37,4		28,2
Média	18,9	23,6	16,5	16,3	22,2	17,0	25,5		17,4

Observa-se que percentagens de redução dos valores pontuais da concentração de sedimentos são bastante inferiores comparativamente às observadas anteriormente para o valor médio C_s , nos ensaios onde existiam diferenças significativas na forma entre os perfis de velocidades nos transdutores T2 e T5 (ensaios S1-1 e S3-1), confirmando assim que alguns dos valores de C_s obtidos não serão os mais representativos.

No entanto, atendendo aos valores de percentagem de redução obtidos nos quadros 4.17 e 4.18, não se verifica uma influência significativa do número de obstáculos na concentração média de sedimentos em suspensão na corrente.

Nas figuras 4.20 e 4.21 pode observar-se uma relação linear entre C_{s0} e C_{sBF} e entre C_{s0} e C_s .

AF.

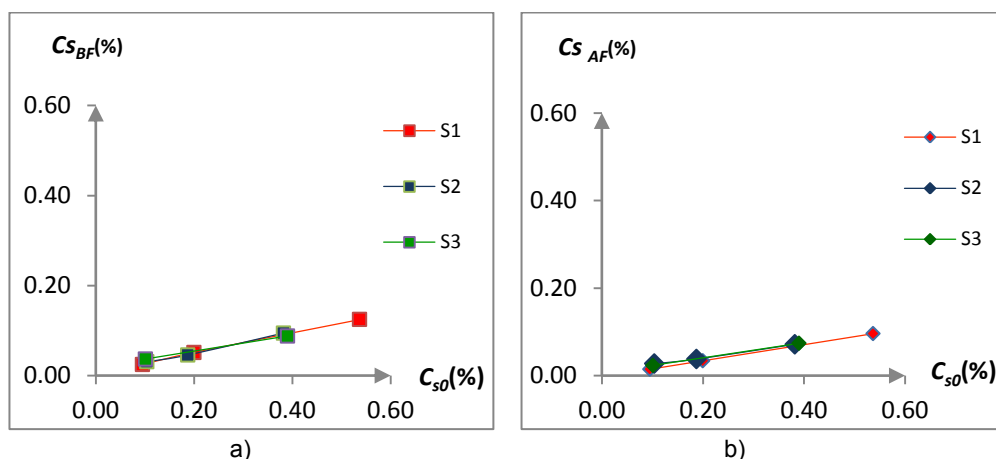


Figura 4.20 – a) Relação entre C_{s0} e C_{sAF} ; b) Relação entre C_{s0} e C_{sBF} .

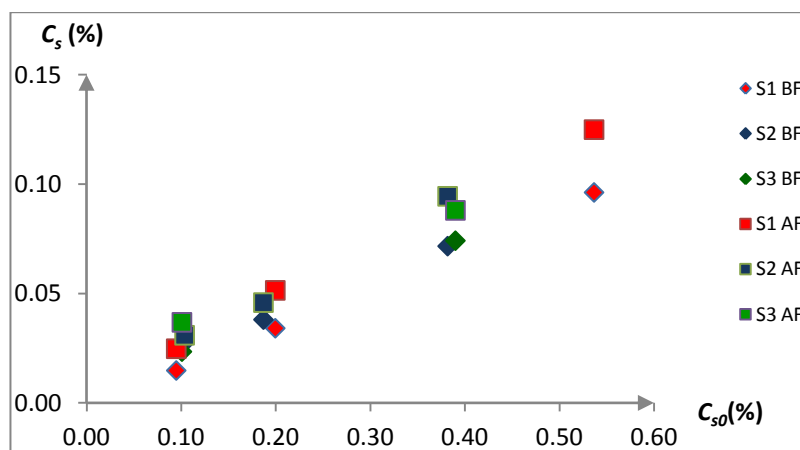


Figura 4.21 - Relação entre C_{s0} e C_{sAF} e entre C_{s0} e C_{sBF} .

A relação entre C_{s0} e C_{sAF} é praticamente igual nas séries S1, S2 e S3. Globalmente, tendo em conta os eventuais erros associados ao cálculo das C_s , não existe um efeito significativo do número de obstáculos (e consequentemente do espaçamento entre obstáculos) na relação entre C_{s0} e C_{sAF} .

Em todas as séries pode-se observar (Figura 4.21), que quanto maior a C_{s0} , maior a diferença entre C_{sAF} e C_{sBF} do respectivo ensaio. O mesmo foi observado em Rossato (2010).

Na figura 4.22 observa-se a relação entre C_{sAF} e C_{sBF} . Estão incluídos não só os valores obtidos neste estudo (S1, S2 e S3), como também os de Alves (2008) (sem a presença de obstáculos) e Rossato (2010) que utilizou um obstáculo de 20 cm de altura.

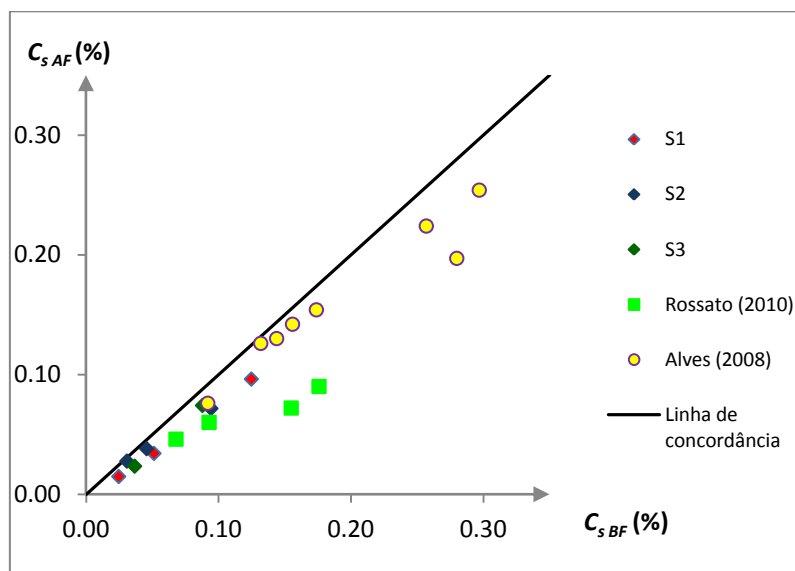


Figura 4.22 - Relação entre C_{sBF} e C_{sAF} no presente estudo, Rossato, (2010), e em Alves, (2008).

Como se pode observar, os valores obtidos neste estudo situam-se aproximadamente entre os de Rossato (2010) e de Alves (2008), e traduzem as percentagens de redução de C_s de montante para jusante determinadas no quadro 4.17.

Na figura 4.23 apresentam-se os perfis adimensionais de concentração de sedimentos em suspensão a montante dos obstáculos (a)) e a jusante dos obstáculos (b)).

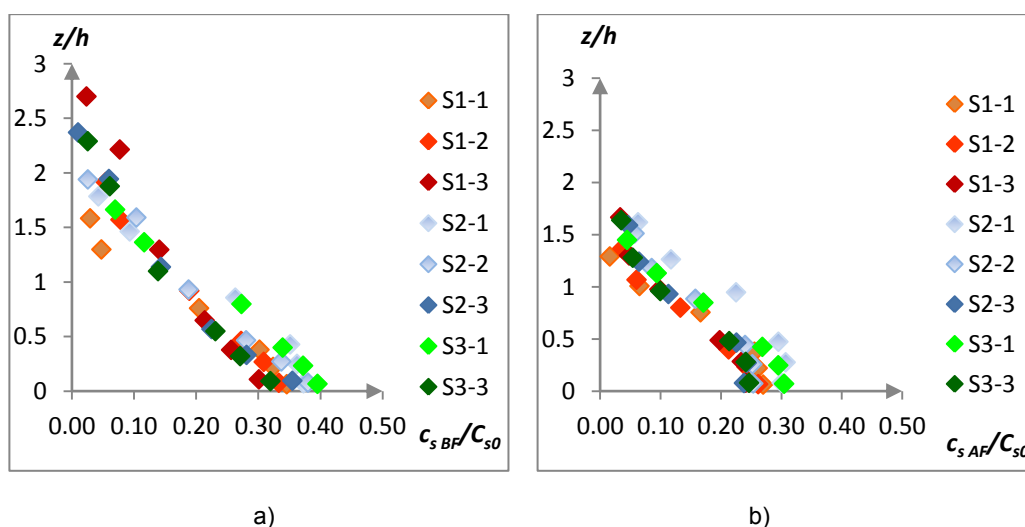


Figura 4.23 - Perfis adimensionais de concentração de sedimentos a: a) montante dos obstáculos b) jusante dos obstáculos.

Utilizaram-se os parâmetros adimensionais z/h e c_s/C_{s0} . Optou-se por não utilizar o parâmetro c_s/C_s devido às fontes de erro que eventualmente afectaram o cálculo de C_s . Como se pode observar, os perfis adimensionais de concentração são bastante semelhantes, podendo-se concluir que não existe influência da concentração inicial de sedimentos em suspensão nem do número de obstáculos (e consequentemente do espaçamento entre obstáculos) nesta característica da corrente de turbidez. Existe uma maior dispersão de resultados na parte superior do perfil adimensional a montante dos obstáculos, tal como em Alves (2008) e em Rossato (2010). Em Rossato (2010) essa dispersão foi atribuída à onda de retorno formada pela corrente ao colidir com o obstáculo. No entanto, é também possível que esta maior dispersão seja devida aos erros de medição que afectam a determinação das concentrações de sedimentos das amostras da parte superior da corrente serem maiores do que no resto das amostras, uma vez que se tratavam de quantidades mais pequenas de sedimentos em suspensão.

No quadro 4.19 são apresentados os parâmetros característicos da corrente, nomeadamente a aceleração da gravidade reduzida (g'), o fluxo sedimentar (B), o número de Richardson (Ri) e o número de Froude densimétrico (Frd), nas secções dos transdutores T2 e T5.

Quadro 4.19 - Parâmetros característicos da corrente nas secções dos transdutores T2 e T5.

Ensaio	T2				T5			
	g' (cm/s ²)	B (cm ³ /s ³)	Ri	Frd	g' (cm/s ²)	B (cm ³ /s ³)	Ri	Frd
S1-1	0,401	14,706	1,176	0,922	0,240	8,310	0,802	1,117
S1-2	0,835	42,892	0,702	1,193	0,554	18,313	1,705	0,766
S1-3	2,027	107,329	0,574	1,320	1,562	106,396	0,626	1,264
S2-1	0,502	16,025	1,352	0,860	0,449	11,471	1,399	0,845
S2-2	0,744	32,832	0,818	1,106	0,618	24,261	0,999	1,001
S2-3	1,533	78,082	0,693	1,201	1,163	70,117	0,686	1,208
S3-1	0,597	19,431	1,911	0,723	0,380	9,040	1,895	0,726
S3-2								
S3-3	1,427	71,162	0,746	1,158	1,202	56,839	1,052	0,975

Pode observar-se uma diminuição da aceleração da gravidade reduzida e do fluxo sedimentar de T2 para T5 (de montante para jusante dos obstáculos), devido à redução que ocorre da velocidade média e concentração média de sedimentos em suspensão da corrente.

Analisando o número de Richardson Ri e o número de Richardson inicial Ri_0 (ver quadro 4.3), verifica-se que após a zona de imersão existe uma mudança no regime de escoamento da corrente, de rápido para lento, nos ensaios S1-1, S2-1 e S3-1 (ensaios de concentrações médias de sedimentos em suspensão iniciais mais baixas). Entre as zonas de montante e de jusante dos obstáculos, observam-se algumas mudanças de regime, mas que podem não traduzir apenas o efeito da presença dos obstáculos, devido aos valores da velocidade média e da concentração média de sedimentos em suspensão na corrente poderem eventualmente não ser os mais representativos, nomeadamente nos ensaios S1-1 e S1-2, e pela proximidade do transdutor de jusante aos obstáculos. A análise do número de Richardson permite confirmar o que já se tinha referido na análise da figura 4.6.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

Na presente dissertação, pretendeu-se caracterizar experimentalmente o escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos e assim contribuir para o conhecimento no tema do controle da sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez, e vem no seguimento dos trabalhos realizados por Alves (2008), Rossato (2010), e Rossato e Alves (2011), que caracterizaram experimentalmente o escoamento de correntes de turbidez sem obstáculos e com apenas um obstáculo. As correntes de turbidez de fundo simuladas, foram geradas pela diferença de densidade criada através da introdução de uma mistura de água e sedimento fino no canal de ensaios contendo água a uma altura H . Realizaram-se nove ensaios experimentais onde se fez variar a concentração de sedimentos em suspensão e o número de obstáculos colocados no canal. Foram efectuadas medições de velocidades, concentrações e de temperaturas em cada ensaio, permitindo assim avaliar as características hidrodinâmicas da corrente e o efeito da influência dos obstáculos.

Após a análise dos resultados obtidos, conclui-se que a presença de múltiplos obstáculos tem influência em certas características hidrodinâmicas da corrente não só na região a jusante dos obstáculos, como também na região a montante.

Com base nos parâmetros característicos iniciais, em particular, no número de Richardson e no número de Reynolds, verificou-se que em todos os ensaios realizados o escoamento à entrada do canal (antes da zona de imersão) ocorre em regime rápido e turbulento.

Observou-se na região a montante dos obstáculos que a frente da corrente se desloca com velocidade aproximadamente constante, sofrendo uma progressiva redução durante a passagem pela zona dos obstáculos. Após a passagem de todos os obstáculos, a velocidade da frente aumenta até se atingir um valor (inferior ao que tinha na zona de montante), que se mantém aproximadamente constante. Com base nos valores da velocidade da frente a montante e a jusante dos obstáculos, obteve-se uma redução da velocidade da frente, relacionada com o valor da velocidade a montante. Essa redução foi maior para velocidades da corrente de aproximação aos obstáculos mais elevadas, e os seus valores situaram-se entre os 10,7% e os 21,4%, revelando alguma influência do número de obstáculos e do seu espaçamento. O valor médio obtido para o parâmetro $U_f/B_0^{1/3}$ foi de 0,79, situado dentro da gama de valores da literatura. Observou-se ainda que os obstáculos podem aumentar significativamente a mistura entre a corrente e o fluido ambiente, nomeadamente na zona do espaçamento entre obstáculos, provocando uma maior diluição da frente da corrente.

Os perfis de velocidade obtidos pelo sistema UVP permitem concluir que os obstáculos não influenciam de modo significativo a forma dos perfis de velocidade entre as zonas a montante e jusante dos obstáculos. Apenas foi verificada uma alteração na forma dos perfis de velocidade na zona incidente ao obstáculo, devida à interface da corrente com a água na zona inferior.

Pela observação dos valores da velocidade média da corrente ao longo do canal conclui-se que a presença dos múltiplos obstáculos traduz-se numa redução da velocidade média da região a montante para a região a jusante dos obstáculos, não sendo visível uma influência do número de obstáculos e do espaçamento entre obstáculos. Pela análise da variação de U , h e h_t ao longo do tempo no transdutor T2 (situado a montante dos obstáculos), conclui-se que a presença dos múltiplos obstáculos origina na região de montante, uma redução da velocidade média e um aumento da altura média corrente e da altura da interface da corrente com a água ao longo do tempo. Foi ainda observado que a relação entre a velocidade máxima e a velocidade média da corrente (U_{max}/U) se mantém constante ao longo do canal, e a relação entre a altura do ponto de velocidade máxima e a altura média da corrente (h_m/h), e a relação entre a altura do ponto onde a velocidade se anula e a altura média da corrente (h_t/h) mantêm-se constantes a montante e jusante dos obstáculos.

Verificou-se uma redução do valor médio da concentração de sedimentos em suspensão (C_s) ao longo do canal. A maior redução aconteceu na zona de imersão devido à mistura do escoamento à entrada do canal com o fluido ambiente. Após a zona de imersão, entre as zonas de montante e jusante dos obstáculos, foi obtido o valor médio de 25% para a redução da concentração média de sedimentos. Este valor traduz não só a influência da presença dos obstáculos, como também, a mistura da corrente com o fluido ambiente na zona da interface e a deposição de sedimentos que ocorre naturalmente nas correntes de turbidez, ao longo do canal (sem obstáculos). O número de obstáculos e o espaçamento utilizados não revelou ser um factor importante na evolução da concentração média de sedimentos em suspensão ao longo do canal, nem na forma dos perfis de concentração.

Relativamente aos regimes de escoamento em função do espaçamento dos obstáculos (figura 2.20), pela observação da frente da corrente durante os ensaios, e dos valores da redução da velocidade da frente, conclui-se que no presente estudo, poderão ter ocorrido dois desses regimes, não só dependendo do espaçamento entre obstáculos mas também da velocidade da própria corrente. Assim, para o ensaio S3-1 e em todos os ensaios das séries S1 e S2, supõem-se estar na presença do regime de escoamento sobre obstáculos isolados, enquanto nos ensaios S3-2 e S3-3, o regime mais provável é o “*wake-interference*” (no entanto, é possível que o regime “*wake-interference*” apenas ocorresse durante os primeiros obstáculos, devido à progressiva diminuição da velocidade da frente). Baseado na redução da velocidade da frente, pode ainda concluir-se que no presente estudo, a alteração do regime de escoamento (de “*wake-interference*” para regime de escoamento sobre obstáculos isolados), apresentou maior influência na redução da velocidade da frente da corrente, do que o aumento do número de obstáculos (relacionado com o aumento da mistura da corrente com o fluido ambiente que ocorre na zona junto ao fundo, no espaçamento entre obstáculos).

Analisando os perfis médios de velocidade dos transdutores colocados entre obstáculos (apenas no ensaio S1-1) pressupõem-se estar na presença do regime de escoamento sobre obstáculos isolados pois os perfis de velocidades destes transdutores apresentavam bastantes semelhanças com os restantes.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Nos ensaios experimentais da presente dissertação, foram utilizados obstáculos de 5 cm de altura, colocados num trecho do fundo do canal de ensaios. No entanto foi verificado que a distância dos obstáculos ao equipamento de medição pode ter eventualmente influenciado alguns resultados. Na impossibilidade da utilização de um canal de ensaios de maior comprimento, uma das possíveis soluções seria em utilizar um trecho de obstáculos mais reduzido. Neste caso, o número de obstáculos a colocar deveria ser menor também. Diversas investigações sobre este tema poderiam então ser feitas, por exemplo, fazendo variar a altura dos obstáculos e o diâmetro mediano do sedimento utilizado na simulação das correntes de turbidez. As medições na zona dos obstáculos podem ainda ser melhoradas, por exemplo utilizando técnicas de tratamento de imagem e a colocação de mais transdutores do sistema UVP, de modo a permitir uma caracterização mais completa e precisa do escoamento nesta zona.

A determinação de perfis granulométricos da corrente (não efectuada neste estudo), seria interessante para verificar a influência da altura dos obstáculos na distribuição granulométrica de sedimentos em suspensão na corrente ao longo do canal. Outro possível aspecto seria a quantificação da retenção de sedimentos que ocorre na zona do trecho de obstáculos de modo a verificar quais os locais onde existe mais deposição de sedimentos, bem como a identificação de locais onde a corrente possa ter tendência em provocar erosão no fundo devido à presença e interacção entre obstáculos.

6 Bibliografia

- **Adduce, C.; Lombardi, V.; Sciortino, G.; Morganti, M. (2009)**, “Roughness effects on gravity currents dynamics”, 33rd IAHR congress, *Università Roma Tre, Roma, Italy*.
- **Alves, E (2008)**, “Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez”, *Tese de doutoramento elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no âmbito do protocolo de cooperação entre o Instituto Superior Técnico e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.
- **Altinakar, M.S. (1988)**, “Weakly depositing turbidity currents on small slopes”. *Tese de doutoramento N° 738, École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- **Altinakar, M.S.; Graf, W. H.; Hopfinger, E. J. (1990)**, “Weakly depositing turbidity current on a small slope”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 55-80.
- **Altinakar, M.S.; Graf, W. H.; Hopfinger, E. J. (1996)**, “Flow structure in turbidity currents”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 713-718.
- **Akiyama, J.; Stefan, H.G. (1984)**, “Plunging flow into a reservoir: Theory”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 4, pp. 484-499.
- **Batucu D.G.; Jordan J.M. (2000)**, “Siltting and Desilting of Reservoirs”, *A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield*.
- **Bouvard, M. (1992)**, “Mobile barrages and intakes on sediment transporting rivers”, *IAHR Monograph Series, AA Balkema, Rotterdam*. (Não consultado).
- **Ellison T.H.; Turner J.S. (1959)**, “Turbulent Entrainment in Stratified Flows”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.6.
- **Fan, J.; Morris, G.L. (1998)**, “Reservoir sedimentation handbook – Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use”, *McGraw-Hill. USA*.
- **García, M. (1989)**, “Depositing and eroding sediment-driven flows: turbidity currents”, *Tese de doutoramento, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota*.
- **González, J (2007)**, “Experimental study of reservoir turbidity currents - Development and application of data processing routines for velocity and bed profiles”, *LNEC*.
- **Graf, W.H.; Altinakar, M.S. (2000)**, “Hydraulique fluviale, écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple”, *Traité de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*.
- **Hanna, S.R; Britter, R.E. (2002)**, “Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites”. *American Institute of Chemical Engineers*.

- **ICOLD (1989)**, "Sedimentation control of reservoirs – Guidelines". *Bulletin 67, Commission on Large Dams*.
- **Kostic, S.; Parker, G. (2003)**, "Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 2, pp. 127-140.
- **La Rocca, M.; Adduce, C.; Sciortino, G.; Pinzon, A. B. (2008)**, "Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom", *Physics of Fluids 20*, 106603, *Università degli Studi Roma TRE*.
- **Mahmood, K. (1987)**, "Reservoir Sedimentation: Impact, Extent and Mitigation", *World Bank Technical Paper No.71, Washington D.C.*
- **MET-FLOW (2002)**, "User's guide – UVP monitor, model UVP-DUO with software version 3", *Release 5, Draft Edition*.
- **Oehy, C.D. (2003)**, "Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents", Tese de doutoramento N°2684, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.
- **Oehy, C.D.; Schleiss, A.J. (2007)**, "Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.133, No.6.
- **Parker, G.; García, M.; Fukushima, Y.; Yu, W. (1987)**, "Experiments on turbidity currents over an erodible bed". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 25, pp. 123-147.
- **Pérez-Jiménez, C.; Horvat, A.; Sinai, Y.; Franssen, .M. (2008)**, Influence of Obstacles on the Development of Gravity Current Prior to Backdraft", *Fire Technology 2008*, DOI 10.1007/s10694-008-0066-4.
- **Peters, W.D.; Venart, J.E.S. (2000)**, "Visualization of rough-surface gravity current flow using laser-induced fluorescence", *9th International symposium on flow visualization*.
- **Prinos, P. (1999)**, "Two-Dimensional Density Currents over Obstacles", *18th IAHR Congress. Graz. Austria*. 23. 24. (Não consultado).
- **Rossato,R. (2010)**, "Effect of obstacles on turbidity currents hydrodynamics", Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente e do Território, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.
- **Rossato, R.; Alves, E. (2011)**, "Experimental study of turbidity currents flow around obstacles", *7th Int. Symp. on Stratified Flow, Rome, Italy*.
- **Sousa, A.L. (2011)**, "Trocas de massa no interior de uma corrente de densidade", Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- **White, R. (2001)**, "Evacuation of sediments from reservoirs", *Thomas Telford Publishing. London, United Kingdom*.

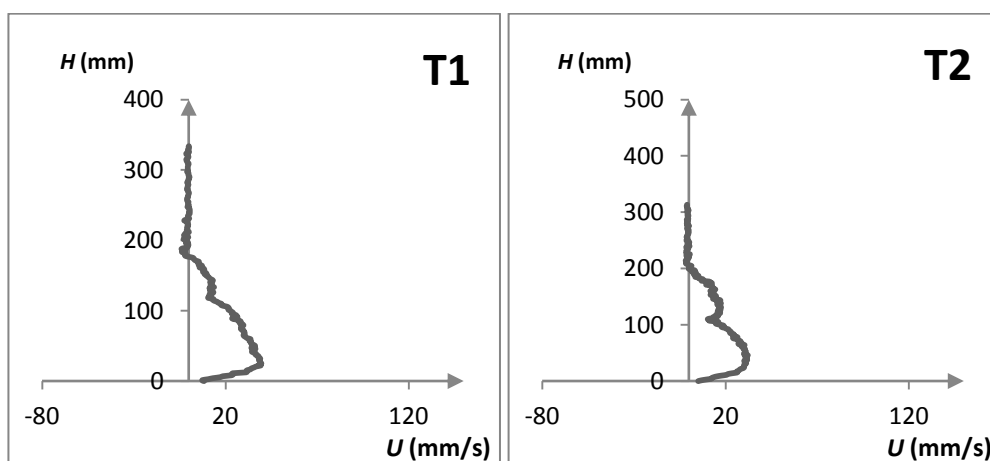
Anexos

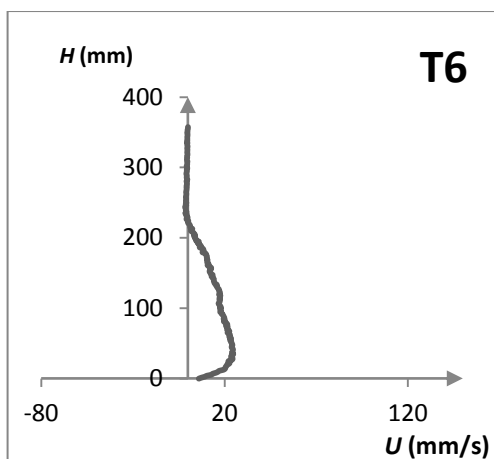
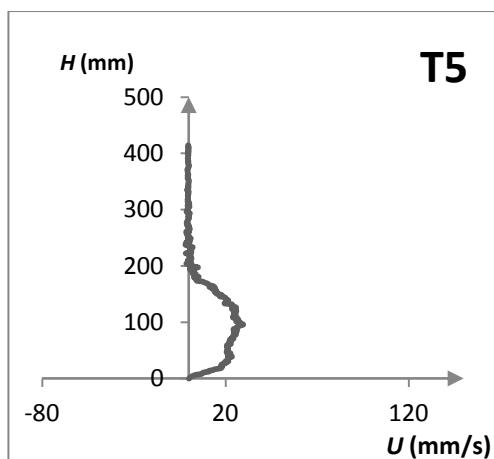
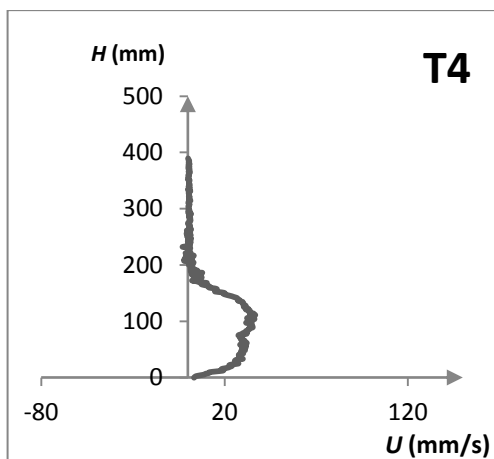
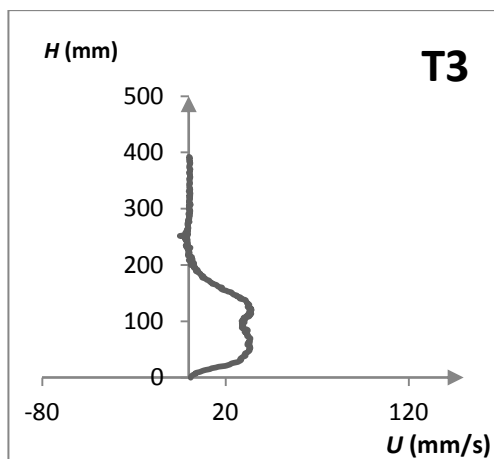
Anexo 1 – Valores da massa volúmica e de viscosidade cinemática da água em função da temperatura utilizados.

Ensaio	T (°C)	ρ_a (kg/m ³)	ν (cm ² /s)
S1-1	16,5	998,8	0,01090
S1-2	21,0	998,0	0,00980
S1-3	20,5	998,1	0,00991
S2-1	21,5	997,8	0,00965
S2-2	21,0	998,0	0,00980
S2-3	21,0	998,0	0,00980
S3-1	16,5	998,8	0,01090
S3-2	16,5	998,8	0,01090
S3-3	16,0	998,9	0,01110

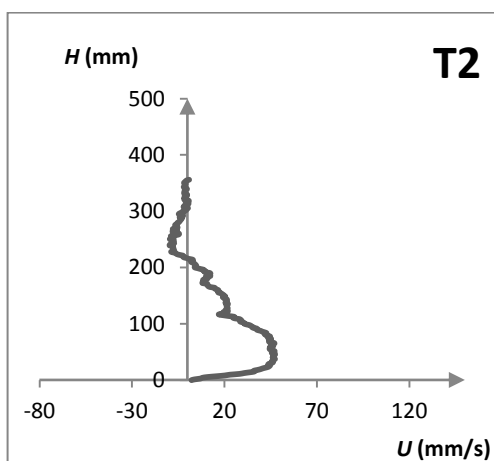
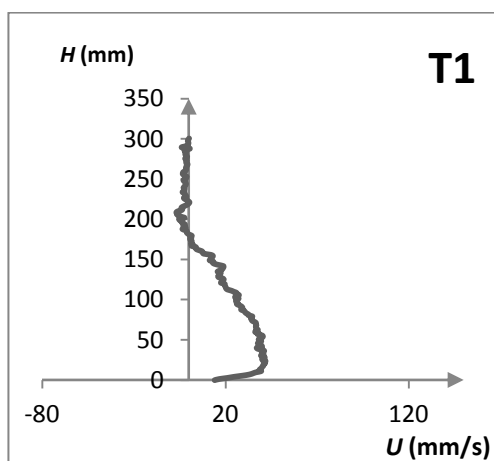
Anexo 2 – Perfis médios de velocidade da corrente nos transdutores (T1, T2, T3, T4, T5, T6).

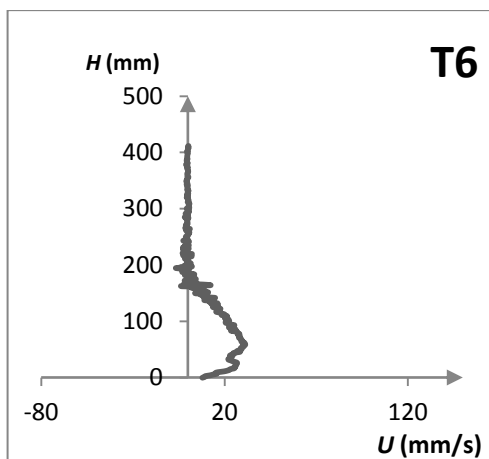
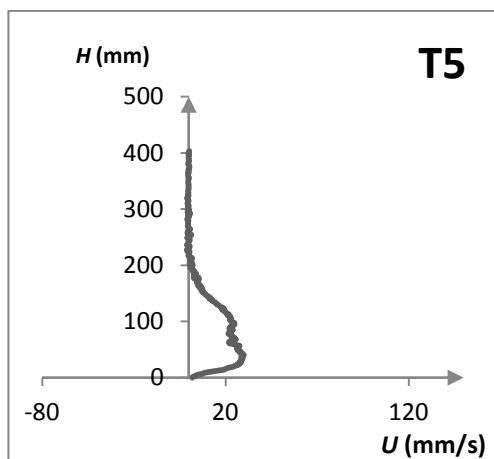
Ensaio S1-1



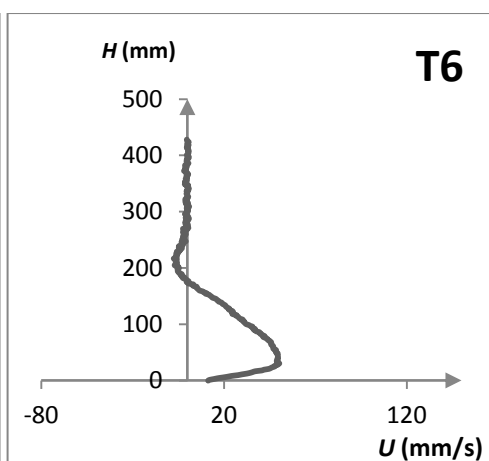
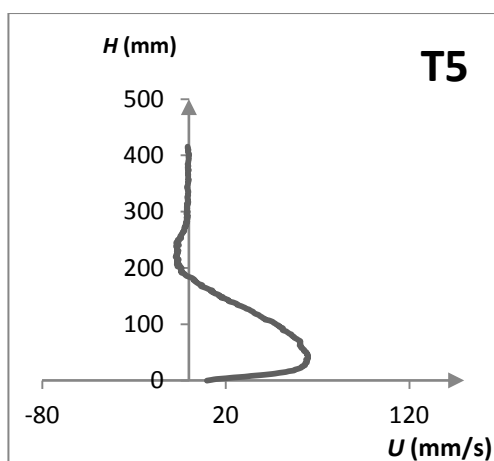
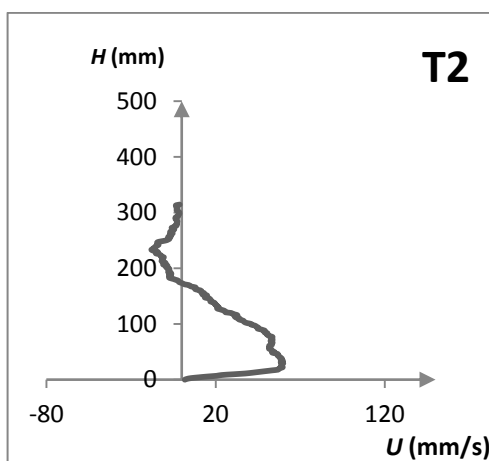
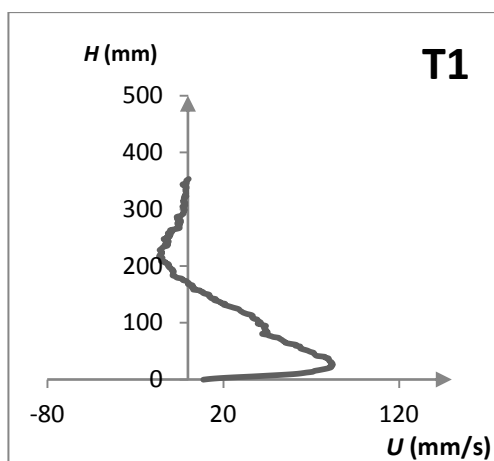


Ensaio S1-2

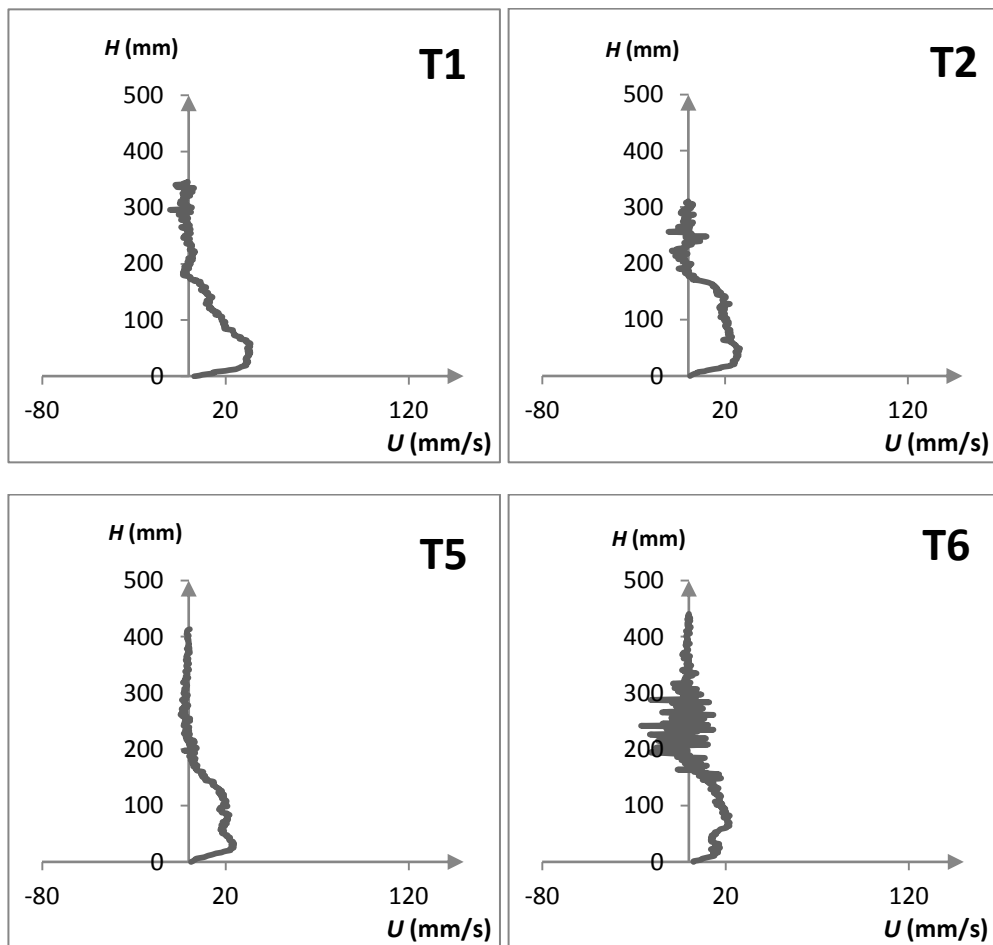




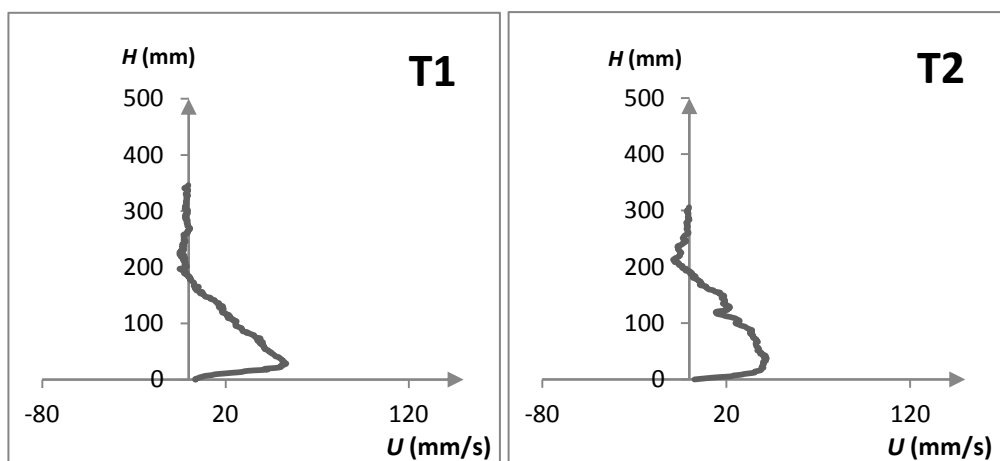
Ensaio S1-3

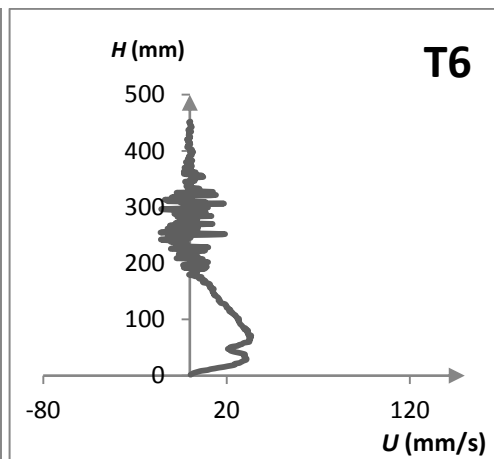
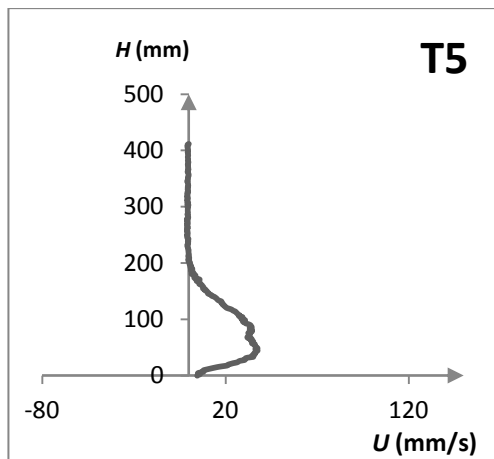


Ensaio S2-1

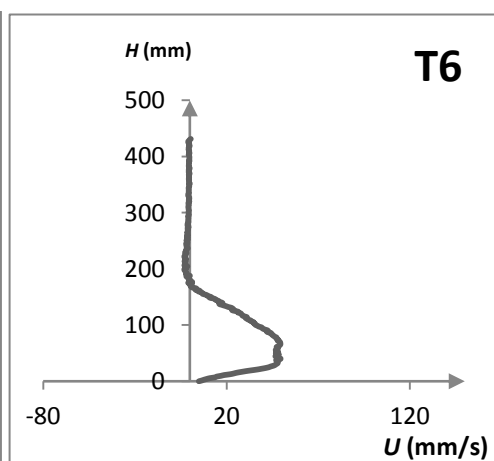
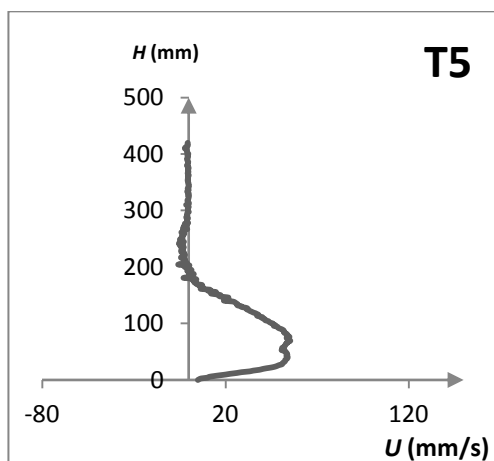
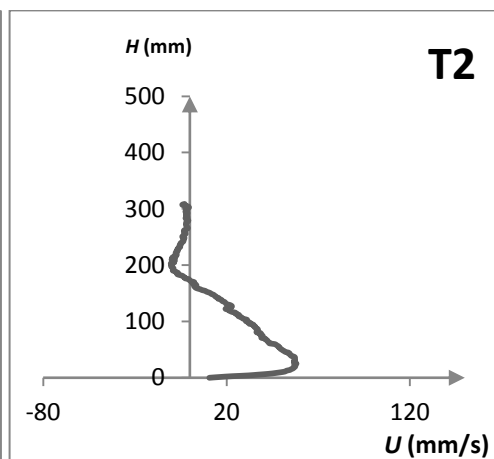
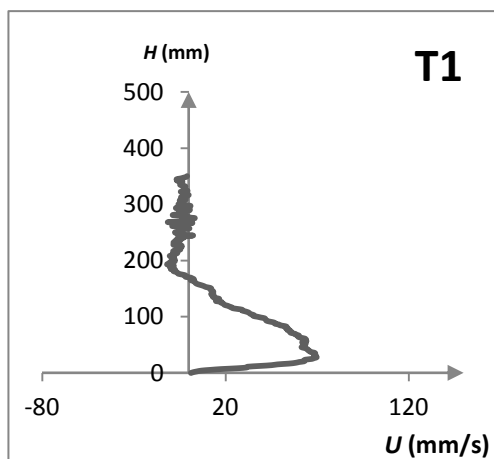


Ensaio S2-2

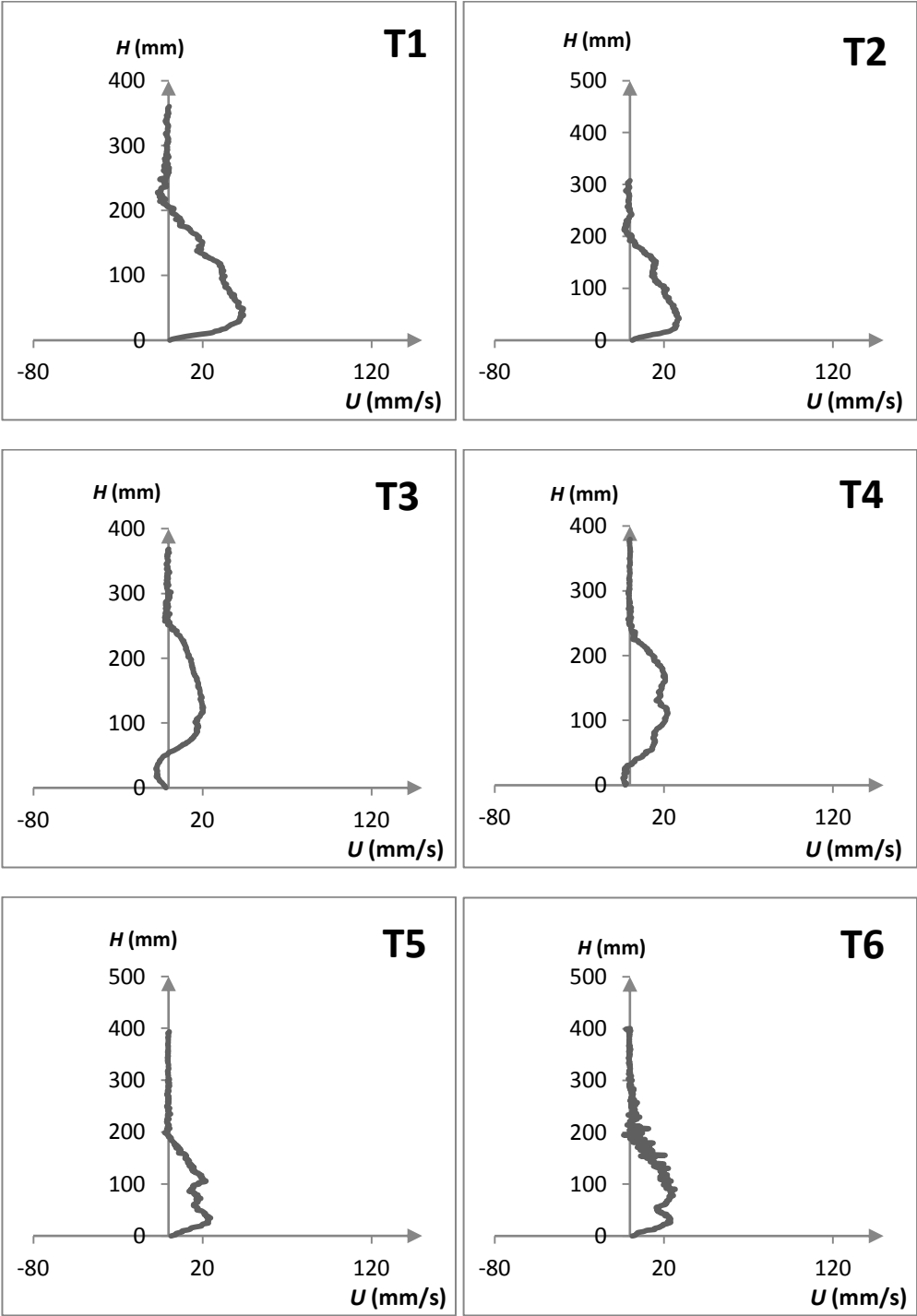




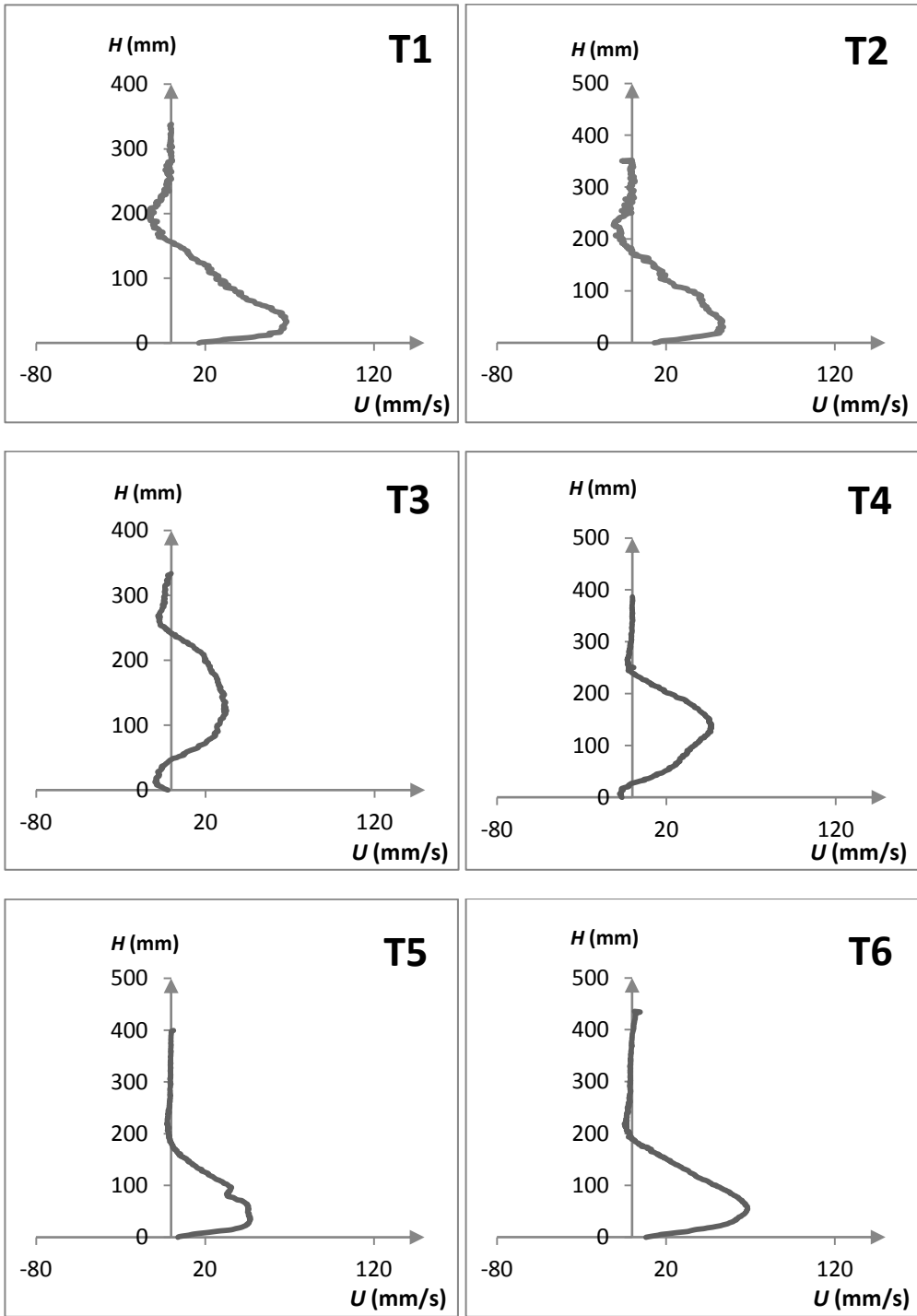
Ensaio S2-3



Ensaio S3-1



Ensaio S3-3



Anexo 3 – Planta e corte da instalação experimental.

